

Communication 50

Etude expérimentale de refuges à poissons aménagés dans les berges de rivières soumises aux éclusées hydroélectriques

Jean-Marc Ribi

- N° 23 2005 Master of Advanced Studies (MAS) in hydraulic schemes
Collection des articles des travaux de diplôme
- N° 24 2006 S. Sayah
Efficiency of brushwood fences in shore protection against wind-wave induced erosion
- N° 25 2006 P. Manso
The influence of pool geometry and induced flow patterns in rock scour by high-velocity plunging jets
- N° 26 2006 M. Andaroodi
Standardization of civil engineering works of small high-head hydropower plants and development of an optimization tool
- N° 27 2006 Symposium érosion et protection des rives lacustres
Bases de dimensionnement des mesures de protection des rives lacustres
- N° 28 2007 A. Vela Giró
Bank protection at the outer side of curved channels by an undulated concrete wall
- N° 29 2007 F. Jordan
Modèle de prévision et de gestion des crues - Optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue
- N° 30 2007 P. Heller
Méthodologie pour la conception et la gestion des aménagements hydrauliques à buts multiples
- N° 31 2007 P. Heller
Analyse qualitative des systèmes complexes à l'aide de la méthode de Gomez & Probst
- N° 32 2007 J. García Hernández, F. Jordan, J. Dubois, J.-L. Boillat
Routing System II - Modélisation d'écoulements dans des systèmes hydrauliques
- N° 33 2007 Symposium - Flussbauliche Massnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft / Mesures d'aménagement des cours d'eau pour la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie
- N° 34 2007 B. Rosier
Interaction of side weir overflow with bed-load transport and bed morphology in a channel
- N° 35 2007 A. Amini
Contractile floating barriers for confinement and recuperation of oil slicks
- N° 36 2008 T. Meile
Influence of macro-roughness of walls on steady and unsteady flow in a channel

Préface

Les centrales hydroélectriques à accumulation contribuent à satisfaire la demande en énergie électrique lors des pointes de consommation, grâce à des turbinages séquentiels. Sur les cours d'eau alpins et préalpins concernés, ce mode d'exploitation provoque des variations de débit et de niveau d'eau relativement rapides. Celles-ci sont particulièrement marquées en hiver quand le débit de base est faible. Pour réduire ce marnage, défavorable du point de vue écologique, des mesures constructives telles que des bassins de rétention sont possibles. L'aménagement morphologique du cours d'eau peut également produire un effet de laminage et simultanément offrir des habitats plus intéressants qu'un endiguement linéaire. Lors de revitalisations de cours d'eau soumis aux éclusées hydroélectriques, il est ainsi imaginable d'aménager des refuges à poissons dans les berges. Ces refuges pourraient constituer une mesure de protection des poissons contre les vitesses d'écoulement excessives lors des éclusées et en même temps servir d'habitat.

Dr Jean-Marc Ribi a étudié pour la première fois le potentiel de tels refuges aménagés dans les berges, au travers d'expérimentations systématiques menées dans un canal avec des poissons (truites fario juvéniles). Le canal d'essais a été conçu et construit à cet effet dans une ancienne centrale hydroélectrique, ce qui a permis une alimentation en eau courante. Dr Jean-Marc Ribi a pu optimiser la forme et l'aménagement du refuge dans l'objectif de maximiser le taux présence des poissons dans les conditions d'éclusee. Des mesures de vitesses détaillées ainsi les observations des poissons par vidéo ont permis d'établir le lien entre le cheminement des poissons et le champ des vitesses. Le lien important qui existe entre les débits dérivés dans le refuge, les vitesses d'écoulement à l'interface entre le canal et le refuge et la fréquentation du refuge par les poissons a ainsi pu être démontré. Finalement Dr Jean-Marc Ribi a identifié les paramètres significatifs pour l'établissement d'un projet de refuges en rivière ainsi que les critères de transposition du contexte expérimental à la situation réelle.

Le projet de recherche a bénéficié du financement octroyé au projet *"Integrale Flussgebietsmanagement"* par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) ainsi que de celui accordé par la Commission pour la Technologie et l'Innovation au projet 9676.1 PFIW-IW *"Nachhaltige Nutzung der Wasserkraft – Innovative Massnahmen zur Reduzierung der Schwall- und Sunkproblematik"*. Nos remerciements vont également aux partenaires du projet CTI, Kraftwerke Oberhasli, Groupe E SA, Etat de Fribourg, Ribi SA et Association Suisse de l'Economie des Eaux (SWV), pour leur soutien financier. Le canal expérimental a été financé par l'EIA-Fr et a pu être installé à l'usine de la Maigrauge grâce à la bienveillance du Groupe E SA. Nous remercions aussi Prof. Dr. Antonio Pinheiro et Prof. Dr. Philippe Baran pour leurs suggestions en qualité de membres de jury. Finalement nous adressons notre sincère reconnaissance à Dr. Armin Peter pour son soutien scientifique et ses précieux conseils lors de la réalisation des essais avec les poissons ainsi que pour sa participation au jury de thèse.

Prof. Dr. Anton Schleiss & Dr. Jean-Louis Boillat

TABLE DES MATIERES

	<i>Résumé</i>	7
	<i>Summary</i>	8
	<i>Zusammenfassung</i>	9
1	INTRODUCTION	11
1.1	Problématique des éclusées hydroélectriques	11
1.1.1	La production d'électricité	
1.1.2	Le rôle des centrales à accumulation	
1.1.3	Le milieu naturel affecté par les éclusées	
1.1.4	Une préoccupation entrée dans la loi	
1.1.5	Des projets de recherche de grande envergure	
1.2	Intérêt d'un refuge à poissons	13
1.2.1	Reconstituer des habitats	
1.2.2	Une mesure contre les vitesses excessives des éclusées	
1.3	Contexte, objectifs et déroulement de la recherche	14
1.3.1	Contexte de la recherche	
1.3.2	Objectif de la recherche	
1.3.3	Structure du document	
2	REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	17
2.1	Introduction	17
2.1.1	Objectifs	
2.1.2	Contenu	
2.2	Impacts et mesures d'atténuation des éclusées	18
2.2.1	Contexte général	
2.2.2	Variation du régime hydrologique des rivières soumises aux éclusées	
2.2.3	Variations de la température de l'eau dans les rivières soumises aux éclusées	
2.2.4	Mesures d'atténuation des impacts des éclusées	
2.3	Comportement et sensibilités des poissons	23
2.3.1	Le refuge latéral, habitat de survie	
2.3.2	Expérimentation avec des poissons dans des canaux artificiels	
2.3.3	Effets de la température	

2.4	La truite fario	25
2.4.1	Représentativité de la truite fario	
2.4.2	Densité de truites fario dans les rivières	
2.4.3	Stade juvénile et origine sauvage	
2.4.4	Performance de nage	
2.4.5	Déplacement le long des berges et à proximité du fond	
2.4.6	Températures requises par la truite fario	
2.4.7	L'ablation de la nageoire adipeuse n'affecte pas le comportement du poisson	
2.4.8	Préférence d'habitat de la truite fario	
2.4.9	Les truites fario du Tannenbach à Büttisholz	
2.5	Résumé des informations acquises	31
2.5.1	Informations relatives aux éclusées	
2.5.2	Informations relatives à la truite fario	
2.5.3	Informations relatives aux essais avec des poissons	
2.5.4	Conclusion de la recherche bibliographique	
3	METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE	33
3.1	Procédures, démarche, organisation	33
3.2	Installation expérimentale	35
3.2.1	Critères et ordres de grandeur pour le projet du canal d'éclusées	
3.2.2	Choix du site	
3.2.3	Alimentation en eau	
3.2.4	Eléments constitutifs	
3.2.5	Substrat et revêtement	
3.2.6	Conditions hydrauliques	
3.3	Instrumentation	44
3.3.1	Mesure des débits	
3.3.2	Contrôle de la hauteur d'eau, de la température et de la turbidité	
3.4	Mise en œuvre des poissons	45
3.4.1	Espèce de poissons, stade de développement et provenance	
3.4.2	Autorisation	
3.4.3	Pêche électrique et transport des poissons	
3.4.4	Conditions de captivité et programme d'activités	
3.5	Configurations testées	49

3.5.1	Configuration de base C0	
3.5.2	Configuration de référence C1	
3.5.3	Variantes de configurations	
3.5.4	Dimensions et caractéristiques des configurations	
3.6	Conclusions au sujet de la méthodologie	52
3.6.1	Procédure expérimentale	
3.6.2	Essais avec les poissons	
3.6.3	Configurations à tester	
4	SIMULATIONS NUMERIQUES	53
4.1	Objectifs et étendue de la modélisation numérique	53
4.2	Modélisation 3D avec SSIIM	53
4.2.1	Présentation générale	
4.2.2	Largeur minimale du canal	
4.2.3	Importance des composantes verticales de vitesse	
4.3	Modélisation 2D avec BASEMENT	56
4.3.1	Présentation générale	
4.3.2	Prétraitement	
4.3.3	Post-traitement	
4.4	Analyse des résultats de simulations BASEMENT 2D	60
4.4.1	Analyse visuelle des champs de vitesses	
4.4.2	Analyse de la distribution des vitesses le long de la ligne interface	
4.5	Validation des résultats BASEMENT 2D	71
4.5.1	Mesures de vitesses au micromoulinet	
4.5.2	Comparaison des résultats du micromoulinet avec ceux de BASEMENT 2D	
4.5.3	Corrélation entre les vitesses mesurées et simulées	
4.6	Calcul du débit dérivé	75
4.6.1	Importance du débit dérivé	
4.6.2	Distinction entre le débit dérivé et le débit échangé	
4.6.3	Valeurs et analyse des débits dérivés vers le refuge	
4.7	Conclusion des simulations numériques	81
4.7.1	Simulations hydrauliques 3D avec SSIIM	
4.7.2	Champs de vitesses d'écoulement simulés avec BASEMENT 2D	

4.7.3	Profils de vitesses le long de la ligne interface	
4.7.4	Débit dérivé dans le refuge	
5	EXPERIMENTATION AVEC LES POISSONS	83
5.1	Déroulement des essais	83
5.1.1	Pêches électriques	
5.1.2	Conditions hydrauliques des essais	
5.1.3	Conditions de température et d'éclairage	
5.2	Stationnement des poissons et fréquentation du refuge	87
5.2.1	Repérages de la position des poissons	
5.2.2	Positionnements préférentiels des poissons dans le refuge	
5.2.3	Taux de présence instantanés de poissons dans le refuge	
5.2.4	Taux de présence pondérés de poissons dans le refuge	
5.2.5	Analyse des taux de présence de poissons dans le refuge	
5.2.6	Association du taux de présence avec le débit dérivé	
5.2.7	Effet de l'habitude des poissons sur le taux de présence dans le refuge	
5.3	Cheminement des poissons, distribution des passages	98
5.3.1	Installation de la caméra vidéo	
5.3.2	Analyse des enregistrements vidéo	
5.4	Observations et informations descriptives	106
5.4.1	Cheminements des poissons dans le canal et vers le refuge	
5.4.2	Cheminement préférentiel vers le refuge	
5.4.3	Vitesses de nage dans le mouvement des truites entrant dans le refuge	
5.4.4	Profondeur de nage des poissons	
5.5	Conclusions des essais avec les poissons	110
5.5.1	Conditions d'essais	
5.5.2	Taux de présence de poissons dans le refuge	
5.5.3	Entrées de poissons dans le refuge.	
6	MESURES DES VITESSES D'ECOULEMENT	111
6.1	Paramètres et dimensions	111
6.1.1	Rappel des objectifs et conditions	
6.1.2	Pourquoi mesurer les vitesses en canal plutôt que de les simuler ?	
6.2	Techniques de mesures des vitesses	112

6.2.1	Inventaire des techniques envisagées	
6.2.2	Pourquoi la LSPIV ne convient pas ?	
6.3	Profileur de vitesses par ultrasons (UVP)	113
6.3.1	Description de la technologie UVP	
6.3.2	Equipement et conditions de mesure UVP	
6.3.3	Disposition des transducteurs dans les sections de référence	
6.4	Résultats des mesures UVP	117
6.4.1	Distribution des vitesses dans la section du canal en amont du refuge	
6.4.2	Profils de vitesses dans la section d'interface	
6.4.3	Comparaison des résultats dans la section d'interface	
6.4.4	Explication des écarts constatés	
6.4.5	Comparaison à la distance de 0.065m du fond	
6.4.6	Conclusion des comparaisons	
6.4.7	Analyse de la distribution des vitesses UVP dans la section d'interface	
6.4.8	Profils de vitesses de chaque configuration	
6.4.9	Section du canal située en aval du refuge	
6.5	Conclusions des mesures de vitesses	135
6.5.1	Technique et sections de mesures de vitesses d'écoulement	
6.5.2	Mesures de vitesses	
7	ANALYSE DES RESULTATS	137
7.1	Introduction	137
7.2	Recherche de corrélations simples	138
7.2.1	Objectifs et démarche de la recherche de corrélations simples	
7.2.2	Corrélations entre le taux de présence et les paramètres géométriques	
7.2.3	Corrélations entre le taux de présence et les paramètres hydrauliques	
7.2.4	Recherche de corrélations multiples	
7.3	Critères de dimensionnement du refuge	147
7.3.1	Introduction	
7.3.2	Grandeurs caractéristiques du refuge	
7.3.3	Comparaison des configurations	
7.4	Analyse des entrées de poissons dans le refuge	150
7.4.1	Distribution des entrées pour chaque configuration	
7.4.2	Analyse globale de la distribution des entrées de poissons	

7.4.3	Analyse des préférences de vitesse dans la section interface	
7.4.4	Distribution des passage dans le canal en aval du refuge	
7.5	Conclusions de l'analyse des résultats	157
7.5.1	Etude de corrélations	
7.5.2	Critères de dimensionnement du refuge	
7.5.3	Entrées des poissons dans le refuge	
7.5.4	Configuration C8	
8	INTERPRETATIONS, RECOMMANDATIONS	159
8.1	Bilan des informations acquises	159
8.1.1	Configurations	
8.1.2	Débits dérivées à travers le refuge	
8.1.3	Vitesses d'écoulement à l'interface entre le refuge et le canal	
8.1.4	Fréquentation du refuge par les poissons	
8.1.5	Entrées des poissons dans le refuge	
8.2	Paramètres significatifs pour le projet de refuges en rivière	163
8.2.1	Importance du débit dérivé et de la longueur amont	
8.2.2	Importance de la géométrie du refuge	
8.2.3	Eléments pour le design du refuge	
8.3	Critères de transposition du refuge expérimental en rivière	167
8.3.1	Problématique de la transposition en rivière	
8.3.2	Hypothèses pour déterminer la grandeur du refuge	
8.3.3	Conditions pour le dimensionnement du refuge	
8.3.4	Equidistance entre refuges selon la densité de poissons	
8.3.5	Equidistance selon la capacité de nage des poissons	
8.4	Recommandations pour l'implantation de refuges en rivière	172
9	BILAN, PERSPECTIVES, CONCLUSIONS	174
9.1.1	Bilan de la recherche	
9.1.2	Recherches futures	
9.1.3	Conclusions	
	Bibliographie	177
	<i>Remerciements</i>	
	<i>Curriculum Vitae</i>	

Etude expérimentale de refuges à poissons aménagés dans les berges de rivières soumises aux éclusées hydroélectriques.

En contrebas des aménagements hydroélectriques à accumulation d'eau, les rivières subissent des variations de débit rapides, fréquentes et intenses, assujetties aux impératifs de la production d'électricité. Soumises à ce régime d'éclusées les populations de poissons subissent un déclin avéré. Dans la recherche de solutions d'atténuation, des refuges aménagés dans les berges constituent une mesure de protection des poissons contre les vitesses d'écoulement excessives. Le présent projet fournit les bases de conception de tels refuges. Le processus de recherche est basé sur des expérimentations avec des poissons, menées dans un canal construit à cet effet, qui comporte un refuge. Le principe consiste à générer des conditions hydrodynamiques qui, d'une part sont incommodes dans le canal et qui, d'autre part, attirent le poisson vers le refuge. Le paramètre significatif est la distribution de la vitesse d'écoulement à l'interface entre le canal et le refuge. Le taux de présence de poissons dans le refuge peut être considéré comme l'indicateur de performance.

D'une longueur utile de 12m, pour 1.2m de large, le canal est alimenté en eau de rivière. Il comporte à mi-longueur, un élargissement unilatéral de 1.2m, en forme de créneau rectangulaire, d'une longueur de 2.0m. Au début de chaque essai, 10 à 20 juvéniles de truites fario sont placées dans le canal où s'écoule le débit de base de 10 l/s avec une vitesse moyenne de 0.1 m/s. Puis elles sont exposées durant 3 heures à un débit d'éclusée de 220 l/s. La vitesse moyenne est alors de 1 m/s dans le canal. La position des poissons est repérée chaque 20 minutes et leurs mouvements sont filmés en continu dans le secteur du refuge. Les premiers essais se sont déroulés avec une configuration de base du refuge de forme rectangulaire. Le taux de présence n'était alors que de 35%. Ce taux a doublé grâce à l'installation d'un épi de dérivation qui force un échange d'eau entre le canal et le refuge. Par la suite, la position et l'angle d'orientation de cet épi ont été systématiquement variés dans le but de maximiser le taux de présence. Ainsi, 12 configurations ont été testées à 3 reprises chacune. Les débits dérivés dans le refuge sont calculés par simulation numérique 2D. Par l'analyse de la position des poissons, le taux de présence moyen est établi pour chaque configuration. Le taux maximum atteint 87%, la moyenne est de 75%, et l'écart type vaut 8%. Par le traitement des images vidéo, les cheminements préférentiels sont mis à jour, et la distribution des entrées de poissons est établie pour chaque configuration, au droit de la section à l'interface entre le refuge et le canal. Dans la même section, des profils de vitesses par ultrasons (UVP) ont été mesurés pour les 12 configurations. En associant la distribution des entrées de poissons à celle des vitesses, les préférences sont globalement établies. Les entrées ont lieu majoritairement en aval de l'épi de dérivation, là où les vitesses sont comprises entre 0.0 et 0.2 m/s, soit dans la zone de cisaillement. L'analyse de tous les

résultats a confirmé la représentativité de la configuration qui donne le meilleur taux de présence, pour l'élaboration de refuges expérimentaux à réaliser en rivière. Elle se caractérise par un épi en forme de triangle équilatéral. Enfin, des recommandations sont faites pour le projet d'un prototype de refuge expérimental à réaliser en rivière dans un but de validation.

Mots clés : Eclusee hydroélectrique, refuge à poissons, épis, truite fario juvénile, trajectoire de nage, profil de vitesses UVP, champ de vitesses, simulation BASEMENT 2D.

Summary

Experimental study of fish shelters in riverbanks of rivers submitted to hydropeaking.

Downstream of hydroelectric storage dams, the rivers suffer from rapid, frequent and intense flow variations linked to the power production constraints. Subjected to this hydropeaking phenomenon, the fish population suffers from a known decline. In the research of mitigation solutions, shelters in riverbanks are a protection measure against excessive flow velocities. This project gives the design basis for such shelters. The research process is based on experimentations with fish swimming in a canal built on purpose with a lateral embayment. The principle is to generate hydrodynamic conditions that are uncomfortable in the canal on one hand and attracts the fish to the shelter on the other hand. The significant parameter is the flow velocity distribution in the intersection between the main channel and the lateral fish shelter. The frequentation rate of fish in the shelter can be considered as the performance indicator.

With a length of 12 m and a width of 1.2 m, the canal is supplied with freshwater from a river. At mid-length, the canal holds a one side enlargement of 1.2 m, shaped like a rectangular gap of 2 m long. For each test, after a steady flow of 10 l/s with a mean velocity of 0.1 m/s, 10 to 20 juvenile brown trout are suddenly exposed during 3 hours to a hydropeaking flow of 220 l/s. At that time, the mean velocity in the canal is of 1 m/s. The fish position is observed every 20 minutes and their movements are recorded continuously in the shelter sector. The first tests have been conducted with a basic rectangular shelter configuration. The frequentation rate was only of 35%. This rate has doubled by introducing a deviation groyne that enforced a water exchange between the canal and the shelter. Following this experiment, the position and the orientation angle of the groyne have been systematically varied with the purpose of maximising the frequentation rate. This way, 12 configurations have been tested 3 times each. The flows transiting in the shelter are calculated using a 2D numerical simulation. By analysing the fish positioning, the mean frequentation rate is determined for each configuration. The maximum rate is of 87%, the mean is of 75% and the standard deviation is of 8%. Using video pictures treatment, the preferential fish trajectories are updated and the

fish entrance distribution is determined for each configuration at the interface between the shelter and the channel. On the same interface, ultrasonic velocity profiles (UVP) have been measured for the 12 configurations. By associating the fish entries distribution with the velocities distribution, the preferences are globally established. The entrances happen mostly from downstream of the derivation groyne, in a flow shear zone where the velocities are in a range of 0.0 to 0.2 m/s. Finally, the analysis of all the results confirmed the representativity of the configuration that gives the best frequentation rate, for the development of the experimental shelter's prototype to be realised in rivers. It is composed of a groyne shaped like an equilateral triangle.

Finally, recommendations are given for the execution of an experimental prototype shelter to be realized in a river for validation tests.

Keywords: hydropeaking, fish shelter, groyne, juvenile brown trout, swimming trajectories, UVP velocities profile, velocity field, Basement 2D simulation.

Zusammenfassung

Experimentelle Untersuchung von Fischrefugien in den Uferböschungen von Fliessgewässern welche vom Schwall-/ Sunk- Betrieb der Speicherkraftwerke betroffen sind

Unterhalb von Speicherkraftwerken, welche hauptsächlich in Zeiten von hohem Strombedarf betreiben werden, kommt es regelmässig zu unnatürlichen, raschen Abflussschwankungen. Durch den sogenannten Schwall-/ Sunk- Betrieb gehen die Fischpopulationen nachweislich zurück. Auf der Suche nach Lösungen zur Verringerung dieser Problematik stellen die in Uferböschungen eingelassenen Fischrefugien eine Möglichkeit dar, um die Fische vor den zu hohen Fliessgeschwindigkeiten zu schützen. In der vorliegenden Arbeit wurden die Grundlagen für die Gestaltung solcher Fischrefugien erarbeitet. Die Forschungsarbeit basiert auf Experimenten mit Fischen in einem eigens dafür erstellten Kanal, welcher mit einer Nische versehen ist. Das Prinzip besteht darin, den Fischen mit einer Lockströmung das Refugium anzuzeigen, sobald die hydrodynamischen Bedingungen im Kanal unangenehm sind. Massgebender Parameter ist die Fliessgeschwindigkeit im Übergangsbereich zwischen Kanal und seitlichem Refugium nach einem stationären Basisabfluss mit einer mittleren Fliessgeschwindigkeit von 0.79 m/s. Als Kriterium für die Attraktivität des Fischrefugiums kann die Frequentationsrate herangezogen werden.

Der Kanal mit einer nutzbaren Länge von 12m und einer Breite von 1.2m wird mit Flusswasser versorgt. Auf halber Länge ist Uferseitig eine rechteckige Nische von 2m Länge und 1.2m Breite als Refugium eingebaut. Während jeder Versuchseinheit werden 10 - 20

Bachforellen (Jährlinge) plötzlich für 3 Stunden einer Schwall-Abflussmenge von 220 l/s ausgesetzt. Die mittlere Fliessgeschwindigkeit im Kanal beträgt folglich 1 m/s. Alle 20 Minuten wird die Position der Fische überprüft, gleichzeitig wird deren Bewegung im Refugium mit einer Videokamera aufgezeichnet. Erste Versuche mit einem einfachen rechteckigen Fischrefugium führen zu einem nüchternen Ergebnis, da lediglich 35 % der Fische das Refugium fanden. Dieser Wert kann mit dem Einbau einer Buhne, welche den Wasseraustausch zwischen dem Kanal und dem Fischrefugium fördert, verdoppelt werden. Anschliessend werden Lage und Richtung der Buhne systematisch variiert, mit dem Ziel, möglichst viele Fische in das Refugium zu locken. So wurden 12 Konfigurationen jeweils dreimal getestet. Die in die Nische abgeleitete Wassermenge wurde mit einer 2D-Simulation errechnet. Der Höchstwert der Fische im Refugium für die erfolgreichste Variante beträgt 87%, der Mittelwert 75% und die Standardabweichung 8%. Die Auswertungen der Videoaufzeichnungen jeder Konfiguration dienen dazu, mehr über die bevorzugten Schwimmwege der Fische im Übergangsbereich, vom Kanal zur Nische, zu erfahren. Im Querschnitt des Übergangsbereiches wurden für die 12 Konfigurationen mittels Ultraschallmessungen Fliessgeschwindigkeitsprofile erstellt. Durch die Gegenüberstellung der Fliessgeschwindigkeitsprofile und der von den Fischen am meisten geschwommenen Strecken konnten die Präferenzen der Fische erkannt werden. Die meisten Zugänge erfolgten stromabwärts der Buhne, dort wo die Fliessgeschwindigkeit in der Scherzone zwischen 0.0 und 0.2 m/s beträgt. Die Analyse sämtlicher Resultate zeigt den repräsentativen Charakter jener Konfiguration mit den meisten Zugängen ins Refugium. Diese Konfiguration kann als Grundlage für die Realisierung eines Prototyps in einem Fliessgewässer dienen. Die Buhne ist in Form eines gleichseitigen Dreiecks auszuführen.

Schlagworte : Schwall-/ Sunk- Betrieb von Speicherkraftwerken, Fischrefugium, Buhne, Bachforellen, Jährlinge, geschwommene Strecke, Ultraschall-Geschwindigkeitsmessung, Geschwindigkeitsfeld, Simulation BASEMENT 2D.

1 INTRODUCTION

1.1 Problématique des éclusées hydroélectriques

1.1.1 La production d'électricité

La problématique des éclusées est induite par la production d'électricité à partir des centrales à accumulation. A l'échelle individuelle, ce type d'aménagement est constitué d'un lac artificiel en altitude, des galerie et puits d'amenée et d'une centrale hydroélectrique en contrebas. Une vallée fermée par la construction d'un barrage est le siège de l'accumulation d'eau. Profitant au mieux du relief, ces aménagements sont souvent combinés en parallèle et en série, dans la partie montagneuse d'un bassin versant avec, dans certains cas, des dérivations de bassins versants attenants. A comparer avec les autres modes de production d'électricité, celle des centrales à accumulation représente en Suisse, plus du tiers de la production totale. La plupart des cours d'eau alpins et préalpins sont concernés.

1.1.2 Le rôle des centrales à accumulation

Par vocation, la production d'électricité doit répondre à la demande des consommateurs et suivre ses variations au cours du temps. Dans ce but, le parc de production est constitué d'installations qui produisent l'énergie de base et d'autres l'énergie de pointe. Les unes, principalement des centrales nucléaires et des aménagements hydroélectriques au fil de l'eau, sont très productives mais peu modulables, du moins pas spontanément. Les autres sont au contraire capables d'activer rapidement tout ou partie de leur puissance. Les aménagements hydroélectriques constitués d'un ou plusieurs réservoirs, sont particulièrement bien adaptés pour produire l'énergie électrique supplémentaire aux heures de pointes journalières. En Suisse, il devrait être possible à l'horizon 2020, d'augmenter la production des aménagements à accumulation jusqu'à 6% en moyenne annuelle, et 20% en hiver, selon différents scénarios (Schleiss, 2007).

1.1.3 Le milieu naturel affecté par les éclusées

L'un des corollaires de ce mode d'exploitation dit « en éclusées », est une modification du régime hydrologique des cours d'eau exploités. Sans précautions prises, le régime naturel et ses aléas sont remplacés la plupart du temps, par une alternance cadencée et monotone des débits en contrebas des restitutions (Figure 1.1). Il est question de débits maximaux journaliers qui valent 10 à 40 fois les débits de base, correspondant en général aux débits

naturel et dans certains cas aux débits de dotation. Depuis plus de 3 décennies, les impacts néfastes de ce régime artificiel d'éclusées sont étudiés. Une réduction préoccupante de la biomasse piscicole est constatée dans les rivières affectées. Cette pratique est aujourd'hui unanimement reconnue comme l'une des causes de la perturbation de l'écosystème subaquatique. Les nuisances sont d'ailleurs souvent amplifiées par la chenalisation des tronçons impactés.

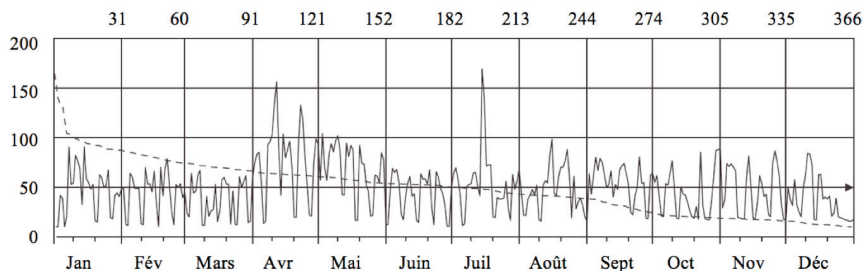


Figure 1.1: *Débits journaliers de la Sarine à Laupen, en m³/s, tirés de l'annuaire hydrologique de la Suisse, 2008. Série chronologique des moyennes journalières en trait plein. Courbe des débits classés en traitillé. Le trait horizontal avec la flèche à droite indique la moyenne annuelle. A cet endroit le régime hydrologique est influencé par le turbinage de l'aménagement hydroélectrique de Schiffenen.*

1.1.4 Une préoccupation entrée dans la loi

En Suisse, cette problématique fait partie intégrante de la loi fédérale sur la protection des eaux, depuis 2011. En effet, l'article 39a intitulé « Eclusées », stipule à l'alinéa 1 que *les détenteurs de centrales hydroélectriques prennent des mesures de construction pour empêcher ou éliminer les atteintes graves que des variations subites et artificielles du débit d'un cours d'eau (éclusées) portent à la faune et à la flore indigènes et à leurs biotopes. A la demande du détenteur d'une centrale hydroélectrique, l'autorité peut ordonner des mesures d'exploitation en lieu et place de travaux de construction.* A l'alinéa 2 il est précisé que *Les mesures sont définies en fonction de la gravité des atteintes portées au cours d'eau, du potentiel écologique du cours d'eau, de la proportionnalité des coûts, de la protection contre les crues et des objectifs de politique énergétique en matière de promotion des énergies renouvelables.* Cette loi contient encore d'autres dispositions d'ordre opérationnel et financier, pour la planification et la réalisation de mesures visant à réduire les effets nuisibles des éclusées.

1.1.5 Des projets de recherche de grande envergure

Face au déclin constaté des populations de poissons, plusieurs projets de recherche ont été menés sur ce sujet. Le rapport final du projet « Réseau suisse poissons en diminution » (Fischnetz, 2004) relève une diminution de 60% de la prise de truites dans les rivières suisses depuis 1980. La pauvreté en refuges naturels dans les rivières chenalisées, combinée avec le stress induit par les éclusées y figurent parmi les causes du déclin piscicole observé. En relation avec les éclusées, Peter & Schager (Fischnetz, 2004) relèvent l'importance de la morphologie et du degré d'aménagement sur l'impact écologique des éclusées. Ils préconisent l'amélioration prioritaire de la qualité des habitats dans les tronçons influencés. Le rapport de synthèse « Schwall/Sunk » du projet Rhone-Thur (Meile & al, 2005), mentionne pour les régions alpines, les variations de la température de l'eau et sa turbidité comme effets nuisibles des éclusées, en plus du colmatage des lits et des crues artificielles hivernales, qui affectent les frayères. Quant aux conséquences écologiques des éclusées, l'étude bibliographique de l'OFEV (Baumann & al, 2003), établit un état de l'art de même qu'un cadre méthodologique pour l'évaluation des impacts, ainsi que des recommandations pour en atténuer les effets.

Pour montrer que les préoccupations au sujet de la gestion des éclusées ne sont pas récentes, les propos de Vibert (1939) sont souvent relatés. Il affirmait entre autre, que le maintien de débits minimaux en aval des barrages ne constituait pas une mesure suffisante pour protéger les poissons. Plus récemment, Pellaud (2007) a montré que la meilleure réponse écologique d'un aménagement hydraulique à buts multiples résulte de la combinaison d'un marnage mitigé et d'une morphologie des berges diversifiée. Si les causes ressortent explicitement de ces lectures, les conséquences semblent fortement dépendantes de l'amplitude des éclusées et de la morphologie des cours d'eau affectés. Dès lors, le succès de la restauration des habitats dans les lits de rivières soumises aux éclusées hydroélectriques est dépendant de mesures prises sur ces 2 aspects du problème, de manière indissociable.

1.2 Intérêt d'un refuge à poissons

1.2.1 Reconstituer des habitats

Pour remédier aux effets des éclusées, il faut distinguer les mesures d'exploitation des aménagements et ouvrages compensatoires. L'objectif de rétablissement de l'équilibre de l'écosystème subaquatique ne sera atteint que par un ensemble d'actions et de moyens complémentaires et coordonnés. Dans ce cadre, le refuge latéral s'inscrit comme mesure de protection des poissons contre les vitesses d'écoulement excessives.

Parmi les caractéristiques d'habitats importantes pour le déplacement des poissons, les refuges figurent comme mesures d'autoprotection, disposées le long des rivières naturelles (Cowx & al, 1998). Des structures végétales et minérales disposées dans le lit sont mentionnées, de même que des zones mortes en surlargeur, utiles en cas de crues ou comme cachette. D'ailleurs la baie en eau peu profonde est recommandée pour diversifier les habitats lors de revitalisations. Le refuge est donc une mesure qui s'impose lors de la revitalisation des cours d'eau, indépendamment de la problématique des éclusées.

1.2.2 Une mesure contre les vitesses excessives des éclusées

En tant que mesure de protection des poissons contre l'effet des vitesses excessives engendrées par les éclusées, le refuge latéral a été expérimenté par Valentin (1995), en canal artificiel avec des poissons. Vu l'importance de cette étude, il en sera question de manière approfondie par la suite. Globalement, il en ressort que les poissons exposés à des situations d'éclusées dommageables, recherchent et trouvent de pareils abris.

Sur la base de ces conclusions, le refuge latéral se présente comme une contribution prometteuse à la restauration des habitats dans les rivières soumises aux éclusées hydroélectriques. C'est pourquoi, le développement de connaissances et l'optimisation de ce type d'ouvrage sont nécessaires en prévision de réalisations systématiques. Le présent projet de recherche porte sur son développement, donnant ainsi une suite au constat fait par Valentin.

1.3 Contexte, objectifs et déroulement de la recherche

1.3.1 Contexte de la recherche

Cette étude expérimentale de refuges à poissons s'inscrit dans le cadre général du programme de recherche « Gestion intégrale des réseaux fluviaux : habitats dynamiques et protection contre les crues » (Schleiss & al, 2008), qui s'articule autour de 2 thèmes principaux. D'une part, les interactions entre les mesures constructives de protection contre les crues et la richesse des habitats aquatiques sont étudiées. D'autre part, les effets des connections longitudinales et latérales des cours d'eau sur la migration des espèces et les flux génétiques sont examinés. Des outils de dimensionnement sont élaborés pour répondre aux questions des projets d'aménagement de cours d'eau. Des informations détaillées sont disponibles à l'adresse www.rivermanagement.ch.

Le programme de recherche est organisé en 4 projets sectoriels qui se présentent ainsi :

Projet sectoriel 1 : Il traite de, (a) la diversité des habitats par rapport à la biodiversité, (b) la continuité des réseaux fluviaux, (c) la dynamique de recolonisation des rivières revitalisées. Il est assumé par l'Institut Fédéral des Sciences et Technologies aquatiques (EAWAG).

Projet sectoriel 2 : Il traite de, (a) l'interaction entre les mesures de protection contre les crues et la diversité des habitats, (b) l'amélioration des habitats dans les cours d'eau soumis aux éclusées, (c) la morphologie des embouchures naturelles des affluents, (d) la stabilité et de la franchissabilité des rampes en enrochements. Il est assumé par le Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (LCH-EPFL).

Projet sectoriel 3 : Il traite des effets des connections longitudinales et latérales des cours d'eau sur la migration des espèces et les flux génétiques. Il est assumé par l'Institut Fédéral de Recherches sur la Neige, la Forêt et le Paysage (WSL).

Projet sectoriel 4 : Il traite de la modélisation numérique des réseaux fluviaux. Il est assumé par le Laboratoire d'Hydraulique, d'Hydrologie et de Glaciologie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich (VAW-ETHZ).

L'étude de refuges à poissons est intégrée dans le projet sectoriel 2, volet b, intitulé « amélioration des habitats dans les cours d'eau soumis aux éclusées. Sous ce même titre, cette étude constitue le volet C) du projet « Mesures novatrices pour la réduction des impacts des éclusées », au bénéfice d'une subvention de la Commission Fédérale pour la Technologie et l'Innovation (CTI-9676-1). Les autres thèmes de recherche de ce projet portent les titres suivants: A) Bases pour l'établissement de l'impact des éclusées sur l'état biologique d'un cours d'eau (Reto Haas, EAWAG) ; B) Influence des éclusées sur les populations de poissons et leurs habitats (Emilie Person, EAWAG) et D) Moyens novateurs pour réduire l'ampleur des éclusées dans un système d'aménagements hydroélectriques complexe (Martin Bieri, LCH-EPFL). Les partenaires académiques de ce projet sont le Laboratoire de constructions hydrauliques de l'EPFL, l'EAWAG et l'Ecole d'Ingénieurs & d'Architectes de Fribourg. Les partenaires de l'économie sont le Groupe-E SA, l'Etat de Fribourg et Ribi SA.

1.3.2 Objectifs de la recherche

L'objectif scientifique de ce travail de doctorat est d'étudier de manière fine et approfondie les situations hydrodynamiques par lesquelles les poissons sont attirés vers un refuge latéral, ainsi que celles qui s'établissent à l'intérieur dudit refuge pour qu'il constitue un microhabitat passager. L'indicateur de performance est le nombre de poissons qui pénètrent dans le refuge, dès l'amorce de l'écluse. Les essais sont effectués pour diverses configurations qui se distinguent par la géométrie et la structure du refuge et de la zone d'appel. L'objectif technique est d'établir des bases de dimensionnement et de design des refuges, ainsi que des

recommandations pour leur mise en œuvre et leur exploitation. Les destinataires sont aussi bien les concepteurs que les réalisateurs concernés par des revitalisations de cours d'eau.

1.3.3 Structure du document

Après cette *introduction (Chap.1)*, la structure du mémoire suit un déroulement classique. Tout d'abord, les composantes de cette problématique sont examinées sous l'angle de la *bibliographie (Chap. 2)*, afin de dresser l'état des connaissances. Cela permet de circonscrire le domaine de travail, en fixant les fondements et les limites de la recherche de même que les connexions avec des domaines attenants.

Puis, la recherche est entamée par l'établissement de la *méthodologie de la recherche (Chap.3)*. S'agissant d'un sujet situé à l'interface entre l'hydrodynamique et la biologie des poissons, il est nécessaire de bien fixer les procédures et protocoles expérimentaux pour permettre d'associer des vitesses de courant avec des comportements de poissons. Ceci fait, il est rendu compte des *simulations numériques (Chap.4)* utiles pour la visualisation des champs de vitesses. Puis sont relatées les 2 opérations parallèles qui constituent la matière première du projet, à savoir les *expérimentations avec les poissons (Chap.5)* et les *mesures des vitesses d'écoulements (Chap.6)*. Sur ces bases *l'analyse des résultats (Chap.7)* est exposée, et des *interprétation et recommandations (chap.8)* en sont tirées en vue de la production de critères et conditions pour le dimensionnement de refuges en rivière. Finalement un *bilan, des perspectives et conclusions (Chap.9)* sont tirés de cette recherche.

2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Introduction

2.1.1 Objectifs

Cette revue bibliographique vise à établir l'état des connaissances sur le thème principal de cette recherche, à savoir le développement de refuges à poissons comme mesure d'amélioration des habitats dans les lits de rivières soumises aux éclusées hydroélectriques. L'objectif est de rassembler et compiler les écrits issus des revues scientifiques de référence ou de mémoires de thèses, afin d'en dégager les informations utiles au fondement, à l'argumentation et à la justification des diverses composantes à considérer. Il s'agit en premier lieu d'établir le bien fondé de cette recherche, en particulier de justifier l'utilité et les débouchés des résultats et produits attendus. Il s'agit ensuite de révéler le déficit de connaissances actuel sur la thématique investiguée pour mieux circonscrire le sujet à explorer. Dans ce prolongement, l'intérêt se porte sur l'acquisition de connaissances d'ordres méthodologique et pratique pour l'accomplissement de la recherche. En ce sens, la source d'informations se trouve principalement dans les expériences effectuées par d'autres ainsi que sur les techniques et moyens mis en oeuvre.

2.1.2 Contenu

Globalement, le sujet couvre 2 domaines scientifiques interdépendants, à savoir l'hydrodynamique des rivières et la biologie comportementale du poisson. Partant de l'hydrodynamique, des données quantitatives relatives aux éclusées sont recherchées, visant à préciser les amplitudes, les fréquences et les variations du phénomène, ainsi que leur impact sur les régimes naturels des cours d'eau affectés. A l'échelle du refuge, des connaissances sur les écoulements dans les niches latérales sont recherchées, de même que sur les techniques de simulation et de mesure des champs de vitesses. Concernant la biologie des poissons, il s'agit en premier lieu de documenter les causes et la gravité des atteintes aux populations soumises aux éclusées. A l'échelle individuelle, l'intérêt se focalise sur le poisson et son habitat en conditions naturelles et altérées. Du point de vue de la méthodologie, comme cela est traité au chapitre 3, la priorité est mise sur les essais en canal avec des poissons. De ce fait, la revue bibliographique devrait contribuer à définir les exigences, les critères, les grandeurs et les conditions requises pour la conception et l'exploitation de l'installation expérimentale à construire pour ce travail de recherche.

2.2 Impacts et mesures d'atténuation des éclusées

2.2.1 Contexte général

Au cours du 20^{ème} siècle, les cours d'eau ont subi des transformations d'ordres géomorphologique et hydrologique à des fins d'exploitation des eaux et de sécurisation du territoire. En Suisse, bon nombre de cours d'eau ont été chenalisés et leur régime d'écoulement modifié par des actions anthropiques (Peter & al, 2004). Les endiguements et autres aménagements perturbent fréquemment les connectivités longitudinales et latérales, causant une segmentation du réseau hydrographique. Ces modifications affectent les populations de truites dans la migration et la diversité des habitats (Peter, 1998). Face à la dégradation de la qualité des cours d'eau, des mesures compensatoires ont progressivement été prises. Leur enchaînement résulte de la stratification des problèmes. Ainsi, quand bien même l'instauration de débits résiduels réglementés porte ses fruits, la problématique des éclusées est aujourd'hui traitée dans sa globalité. En ce sens, elle est une préoccupation d'actualité, qui fait explicitement l'objet des articles 39a, 62c, 82 et 83 de la loi fédérale suisse sur la protection des eaux, état au 1^{er} janvier 2011. En substance, la législation contraint les détenteurs de centrales hydrauliques de prendre des mesures visant à éliminer les atteintes portées par les éclusées, à la faune et la flore indigènes. Elle fixe les conditions, exigences et délais pour la réalisation desdites mesures. Elle prévoit des mesures d'encouragement financier.

Les cours d'eau récepteurs des eaux turbinées ont, dans le prolongement immédiat des aménagements, subi une importante chenalisation destinée à protéger le lit et surtout les berges contre l'action érosive des débits d'éclusées. Wasson & al (1995) constatent que toutes les données bibliographiques concluent sur l'effet néfaste de cette intervention, qui s'exprime par une réduction considérable de la biomasse piscicole. Face à une telle situation, la notion de réversibilité des impacts est mise en évidence ainsi que la nécessité de disposer d'une méthode d'estimation de l'intensité de l'artificialisation, dans une perspective de revitalisation. Par ailleurs, une dégradation générale des habitats naturels est aussi observée le long des rivières concernées (Valentin & al, 1996 ; Ovidio & al, 2006 ; Gouraud & al, 2008). Afin de déceler les causes du déclin piscicole constaté, plusieurs hypothèses ont été examinées dans le projet Fischnetz (2004). En relation avec les éclusées, la qualité morphologique insuffisante des cours d'eau, la modification des régimes d'écoulement et du charriage y sont traitées par Peter & al (2004). Les auteurs relèvent l'importance de la morphologie et du degré d'aménagement sur l'impact écologique des éclusées. Ils préconisent l'amélioration prioritaire de la qualité des habitats sur les tronçons influencés. Baumann & Klaus (2003) ont produit une étude bibliographique consistante sur le sujet. La lecture de cette riche documentation, permet de conclure sur l'importance de la problématique. La plupart des articles contiennent en conclusion, des recommandations pour la recherche de solutions visant

à réduire les impacts, mettant l'accent sur la nécessité d'acquisition de connaissances scientifiques. Elles concernent la régulation des débits turbinés, soit par des actions sur le programme d'exploitation, soit par une rétention à la restitution, ainsi que la restauration d'une morphologie apte à offrir une diversité d'habitat et une disponibilité de refuges (Valentin, 1995).

L'intérêt pour cette problématique étant manifeste, la réflexion se tourne vers une approche plus détaillée des circonstances : Dans quelles conditions le poisson est-il perturbé ? Quels sont les mécanismes ou phénomènes en cause ? Peut-on identifier des paramètres représentatifs ? Peut-on reproduire par modélisation, les situations compromettantes ? Peut-on exploiter le modèle pour développer des configurations protectrices ? Pour aborder ces questions, il y a lieu de subdiviser la recherche bibliographique en 2 voies parallèles, visant à acquérir des connaissances sur le comportement du poisson d'une part et sur les écoulements auxquels ils réagissent d'autre part.

2.2.2 Variation du régime hydrologique des rivières soumises aux éclusées

Les éclusées sont caractérisées par des variations de débit prononcées et fréquentes. Sur des aménagements à accumulation d'eau, ces écoulements sont en principe assujettis aux pointes de consommation d'électricité. Dès lors, l'analyse des variations de débit concerne les échelles temporelles journalière et saisonnière. Pardé (1933) a relevé la grande importance du régime saisonnier pour la classification des cours d'eau, qu'il considère comme la traduction visible de l'action coordonnée des divers facteurs représentatifs du bassin versant. Pour paramétrer ce régime, il introduisit le coefficient mensuel de débits qui est le rapport de chaque moyenne mensuelle au module. Ce rapport est depuis lors, couramment appelé le coefficient de Pardé. Sur cette base il est possible de classer les cours d'eau selon le mode d'alimentation dominant, à savoir la fonte glacière, la fonte nivale et la pluie, en précisant la zone géographique à laquelle appartient le bassin versant. La lecture des écrits de Pardé à ce propos permet de comprendre la portée identitaire et la référence que constitue cette notion de régime hydrologique. Dès lors, une modification de la courbe de régime d'un cours d'eau, résultant de changements climatiques ou d'actions anthropiques, est interpellante. C'est pourquoi, il est intéressant d'analyser les conséquences écologiques des éclusées sous l'angle du régime hydrologique des cours d'eau affectés. Récemment, les résultats d'une telle étude menée sur le Rhône alpin, soit en amont du lac Léman, ont été publiés par Meile & al (2011). Cette partie du Rhône intégralement chenalisée, a une longueur de 130 km et draine un bassin versant de 5220 km², dont 14% de glaciers. Elle est instrumentée par 4 stations de jaugeages successives, opérationnelles depuis 70 à 106 ans. De plus, elle est alimentée par la restitution de 14 grands aménagements hydroélectriques à accumulation. Selon l'Atlas hydrologique de la Suisse (Weingarten & al, 1992) le régime des affluents du Rhône alpin est de type glaciaire à nival alpin, avec des combinaisons. De ce fait, la courbe de régime du Rhône est en forme

de colline, avec le sommet en été. Son allure n'a pas changé au cours du temps. Par contre son amplitude s'est réduite, avec une diminution de la valeur du coefficient de Pardé en été et une augmentation en hiver. En 100 ans, le coefficient de débit du mois de juillet est passé de 2.38 à 1.72 et celui du mois de février de 0.27 à 0.68. Un changement important apparaît manifestement. La question des conséquences écologiques induites reste pour l'heure sans réponse.

Quant aux variations journalières, 2 indicateurs sont retenus pour les caractériser (Meile & al, 2011). L'indicateur des fluctuations journalières du débit, qui est le rapport entre l'amplitude maximale du jour considéré et le débit moyen journalier. Pour le Rhône supérieur l'analyse de l'état actuel, montre une courbe annuelle en creux avec un maximum en hiver et un minimum en été, alors que par le passé, cet indicateur variait très peu au cours de l'année. Le second indicateur concerne la vitesse de croissance et de décroissance du débit, en situation d'éclusee.

Un dernier identifiant hydrologique d'un cours d'eau est sa courbe de débits classés. Dans le cas du Rhône supérieur, un basculement de la courbe autour d'un point charnière situé à environ 150 jours est observé. Les débits dépassés pendant moins longtemps sont plus petits sauf à l'origine, et les autres sont augmentés.

Il apparaît ainsi, à travers ces quelques informations rapportées, qu'un cours d'eau comme le Rhône alpin subit d'importantes modifications hydrologiques, à toutes échelles temporelles.

2.2.3 Variations de la température de l'eau dans les rivières soumises aux éclusées

Le constat d'une modification des caractéristiques hydrologiques d'un cours d'eau soumis aux éclusées, conduit forcément à une interrogation au sujet de la variation de la température de l'eau. Cette question est d'autant plus pertinente si on associe la sensibilité des poissons, en particulier la truite fario, à ce paramètre. En outre, l'implantation des aménagements à accumulation étant en bonne partie justifiée par la maximisation de la chute, des différences importantes de température sont imaginables. Concernant les cours d'eau suisses, une analyse des enregistrements est relatée par Jakob (2010). Globalement il mentionne une élévation de 1.2°C de la température moyenne annuelle dans les rivières de plaine. Aucun accroissement significatif n'est cependant constaté sur la moyenne annuelle des rivières de montagne. De manière générale, une élévation plus rapide de la température de l'eau est constatée au printemps.

Pour une analyse plus détaillée des températures, les échelles pertinentes sont également journalières et saisonnières. Concernant les variations saisonnières, plusieurs modèles de prévision ont été développés et appliqués (Caissie & al, 2001 ; Bélanger & al, 2005 ; Caissie,

2006) pour les rivières non influencées. Si initialement la recherche allait dans le sens de modèles déterministes, de bons résultats sont aujourd'hui obtenus avec des modèles stochastiques. Concernant l'impact thermique des éclusées, la recherche est orientée vers la modélisation de la dynamique de propagation des ondes thermiques (Toffolon & al, 2010 ; Zolezzi & al, 2010).

Sur le Rhône alpin, Meier (2002) ont constaté plusieurs modifications du régime de température de l'eau. Comme celle-ci se réchauffe et se refroidit lentement dans les lacs, le turbinage provoque une élévation de la température de l'eau des cours d'eau récepteurs en hiver et un abaissement en été (Küttel & al, 2002). L'ordre de grandeur est de plus ou moins 1 à 2°C.

Les effets du changement de température induit par les éclusées sur les poissons ne sont pas encore bien connus en raison de la complexité des processus. Ils sont non seulement à rechercher sur l'amplitude des valeurs, mais aussi sur la fréquence et le décalage temporel. Selon Küttel & al. (2002), les impacts de la modification du régime de température sur les poissons sont significatifs. Par exemple, il est constaté une décroissance des populations de cyprinidés en relation avec la réduction des températures estivales ou le décalage de 1 à 2 mois de la période de montaison en raison d'une variation plus graduelle des températures automnales. De même, les lâchés rapides de grandes quantités d'eau, de température différente, peuvent engendrer des changements brusques de la température en aval de la restitution. Les poissons semblent s'adapter plus rapidement à des hausses de température qu'à des baisses (Jungwirth & al, 2003 ; Küttel & al, 2002). Cette sensibilité par rapport à des diminutions rapides de la température de l'eau peut surtout avoir un effet en été quand des flots d'eau froide arrivent. Ce sont donc moins les changements de la température moyenne qui sont susceptibles de nuire aux poissons mais les variations brusques à court terme liées aux éclusées. Dans les affluents du Rhône, tels que la Vispa ou la Lonza, la température peut s'abaisser rapidement de 3°C. De plus, les zones d'eaux peu profondes sont plus exposées à des refroidissements rapides, lors des débits minima en hiver. Ceci peut affecter le frai et les embryons (Meier, 2002). L'ampleur des effets des éclusées et les conséquences qui en découlent dépendent de plusieurs facteurs, tels que la morphologie du cours d'eau, son régime et bien sûr de l'amplitude entre le débit d'éclusee et le débit minimum.

2.2.4 Mesures d'atténuation des impacts des éclusées.

En résumé, la sévérité des impacts écologiques des éclusées est dépendante de l'intensité des actions et de la capacité de réaction des poissons. L'action est exercée par le passage des éclusées et la réaction dépend de l'habitabilité du cours d'eau récepteur. Dans une perspective de conciliation des intérêts en jeu, les mesures à prendre concernent toutes les composantes de la problématique, dans un esprit consensuel : celles qui portent sur les actions en vue de leur

modération et les autres qui visent le renforcement de la capacité de réaction. Dans le rapport final du projet de recherche Fischnetz, Peter & al (2004) mentionne, comme mesures d'atténuation des effets des éclusées, le laminage des débits restitués par des bassins de rétention à grande échelle, la gestion optimisée des séquences de turbinage et l'amélioration de la qualité des habitats le long des tronçons influencés. Sur ce dernier point le potentiel est d'autant plus grand que, dans la majorité des cas, le tronçon concerné a subi une chenalisation. Peter & al (2004) attire également l'attention sur les impacts de la modification du régime hydrologique saisonnier, à savoir les crues hivernales avec charriage, qui coïncident avec la période d'incubation des truites fario, et les étiages d'été. L'étude bibliographique menée par Baumann & al (2003) au sujet des conséquences écologiques des éclusées, comprend un inventaire des mesures pratiquées. Partant du plus radical vers le plus nuancé, et non par ordre de priorité, la liste débute par la dérivation du débit restitué vers un cours d'eau voisin, de plus grande envergure, voire le renoncement à exploiter des cours en état quasi naturel. Puis figurent les mesures affectant l'hydrogramme d'écluse, soit l'abaissement du débit d'écluse et l'élévation du débit minimum, l'un et/ou l'autre et de manière différenciée selon les saisons. La rétention dans des bassins à ciel ouvert ou en cavernes est citée en exemple, de même que la gestion de production décalée entre plusieurs centrales restituant sur un même tronçon. Dans le prolongement, les manœuvres pratiquées de manière graduelle sont préconisées. Enfin les mesures d'amélioration des habitats sont décrites en vue de réduire l'emprise du marnage et d'accroître la superficie submergée en permanence, sous forme d'optimisation de la morphologie du lit et de création de retenues auxiliaires. La majeure partie des mesures présentées dans cette énumération vise la modification des actions. Pour autant, l'amélioration des habitats n'est pas à considérer comme une intervention subsidiaire mais bien comme une mesure associée, ce d'autant plus que les tronçons concernés sont souvent chenalisés. Le refuge à poissons s'inscrit dans ce contexte.

Des recherches récentes ont traité de l'intérêt du développement et de l'optimisation d'aménagements à buts multiples (Heller 2007 ; Heller & al, 2007). Les hydrogrammes d'éclusées quotidiennes sont laminés par épanchement sur des surfaces attenantes au cours d'eau. La restitution différée de l'eau stockée peut être turbinée et l'aménagement constitue un élément paysager et de loisirs intéressant. Pellaud (2007) a montré le gain écologique dont peut bénéficier une rivière sur laquelle un tel aménagement serait réalisé. Meile (2007) a étudié l'influence de la macro-rugosité des rives sur les écoulements permanents et fortement non-permanents, en relation avec les régimes d'éclusées.

2.3 Comportement et sensibilité des poissons

2.3.1 Le refuge latéral, habitat de survie

L'habitat des poissons est bien résumé par Wasson & al (1998), dans le cadre de l'étude des impacts de la chenalisation des rivières. Vu l'importance de cet élément, des extraits recomposés sont reproduits ci-après. Il est tout d'abord relevé que les poissons occupent à priori et dans la mesure du possible, la totalité de l'espace aquatique. Leur existence est dépendante des habitats qui sont caractérisés par une grande variabilité spatio-temporelle (Townsend, 1989). Ils peuvent être regroupés en 2 catégories. Les habitats quotidiens sont destinés à l'alimentation et au repos. Le substrat grossier stable et perméable du lit contient la nourriture nécessaire, en particulier des macroinvertébrés. A proximité de leur zone nourricière, les poissons ont besoin d'abris et de caches pour leur repos physiologique régulier et pour limiter leur déperdition d'énergie face au courant, ou pour se réfugier en cas de danger de prédation, entre autres. Ces structures sont recherchées dans le lit comme le long des berges. Selon leur stade de développement les individus d'une espèce occupent des habitats différents. Leur diversité est donc déterminante pour la capacité d'accueil sectorielle (Fragnoud, 1987 ; Pouilly, 1994). La 2^{ème} catégorie mentionnée par Wasson & al (1998) concerne les habitats de phases critiques, c'est à dire les frayères et les refuges de survie. Ces derniers sont recherchés par les poissons dans leur territoire, en cas de fortes crues, d'étiages sévères ou de pollution. Concrètement, ce sont par exemple des baies, des fosses, des embouchures d'affluents, des abris de grande taille où les individus se rassemblent jusqu'au retour de conditions normales. L'utilisation de ces habitats temporaires est dépendante de leur accessibilité, elle-même conditionnée par les connexions hydrauliques longitudinales et transversales. Si les conditions hydrauliques imposées par les éclusées sont assimilées à celles de fortes crues, il est possible de s'inspirer de références naturelles pour l'esquisse du refuge, sujet de cette recherche.

2.3.2 Expérimentation avec des poissons dans des canaux artificiels

Une fois l'intention de réaliser des essais avec des poissons formulée, encore faut-il se convaincre de la faisabilité d'une pareille opération. Dans ce but, l'attention s'est focalisée sur les comptes-rendus d'essais comparables, où des poissons ont été observés dans des conditions d'éclusées. Après avoir montré la vulnérabilité des juvéniles de l'ombre commun et de la truite fario, par des suivis d'éclusées en rivière, Valentin (1995) a poursuivi ses recherches par des essais en canaux artificiels. Cette phase a été jugée nécessaire pour étudier finement les réponses et déplacements des poissons, face à la difficulté de saisir ce type d'informations dans l'eau opaque des rivières et sous hautes vitesses. Cela permet aussi d'isoler l'effet des éclusées, à interpréter comme action hydrodynamique. Plusieurs auteurs ont précédemment montré l'intérêt d'expérimentations en canaux artificiels avec des poissons

(Heggenes & al, 1988 ; Crisp & al, 1991 ; Vehanen, 2000) pour mieux comprendre le lien entre le poisson et son habitat. En particulier, Bouchard (2004) a montré l'importance des essais sur modèle physique avec des poissons pour la conception des ouvrages migratoires. De même, Silva & al. (2009, 2010) relatent leur recherche sur l'optimisation d'une échelle à poissons pour le barbeau ibérique, par des essais en canal de laboratoire.

Pour les expérimentations avec la truite fario au stade juvénile, Valentin (1995) a travaillé sur le canal du Lapitxuri (Beall & al, 1986), installé en dérivation de la rivière du même nom, qui mesure 130m de long sur 2.9m de large. Il en ressort de précieuses informations méthodologiques et pratiques. Des expérimentations destinées à préciser les facteurs qui contribuent à l'échouage des poissons sur les parties exondées du lit à la suite d'abaissements rapides du plan d'eau, ont été menés avec des truites fario (Halleraker & al, 2003). Le canal d'une longueur utile de 19m sur 3.8m de large, fonctionne en circuit fermé avec de l'eau du réseau d'eau potable renouvelée. L'éclairage est contrôlé. Une rigole est aménagée du côté droit pour reproduire le niveau de basses eaux. En surélévation un lit de galets est aménagé sur 3.5m de largeur, pour reproduire la surface alternativement submergée et asséchée. Vehanen & al (2000) relatent des expérimentations menées avec des truites fario au stade juvénile, dans un canal d'une longueur de 4m sur une largeur de 0.6m. Des structures de tailles différentes ont été placées sur le fond du canal. La recherche portait sur la réaction des poissons face à ces structures, en cas de fluctuations de débits, en considérant l'hiver et l'été. Cette dernière référence a été utilisée comme source d'inspiration pour la conception du canal expérimental construit pour cette recherche.

2.3.3 Effets de la température

Concernant les effets de la température sur le comportement des poissons, Küttel & al (2002) ont procédé à une analyse des conditions préférées et limites pour les espèces de poissons présents dans les cours d'eau suisses. Ces poissons sont des espèces poïkilothermes, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas capables de maîtriser leur température interne. Celle-ci est donc directement dépendante de la température de l'eau ambiante, soit environ 0.1 à 1°C au-dessus de celle du milieu (Beitinger & al, 2000). La température de l'eau influence donc toutes les activités biochimiques et physiologiques des poissons. Elle agit au niveau interne comme facteur de contrôle du métabolisme et aussi sur le comportement externe du poisson, à savoir sa mobilité (Küttel & al, 2002). La plupart des réactions chimiques du corps dépendent de la température. Plus la température est élevée, plus ils réagissent rapidement. A partir d'un certain seuil de température, la digestion s'accélère au point que les poissons n'arrivent plus à trouver suffisamment de nourriture pour satisfaire leur besoin. Dans ces conditions, la couleur de la peau du poisson change et son comportement se caractérise par des alternances entre des phases d'hyperactivité et d'immobilisme. Des températures trop basses provoquent par contre une léthargie (Beitinger & al, 2000). La digestion dure plus longtemps et les individus

réagissent plus lentement à des appâts. Par conséquent ils captent moins de nourriture (Varley, 1967). Beaucoup de poissons cessent de manger pendant l'hiver en raison des températures basses. A des températures encore plus basses, la régulation osmotique cesse de fonctionner et le système nerveux central est inopérant. Les poissons peuvent s'adapter plus rapidement à des hausses de température qu'à des baisses (Küttel & al ; 2002). Donc la létalité dépend aussi du gradient de variation de la température du milieu. Pour chaque espèce, il existe une gamme de température optimale.

2.4 La truite fario

2.4.1 Représentativité de la truite fario

S'agissant de procéder à des essais systématiques avec des poissons, il faut sélectionner une espèce représentative des rivières soumises aux éclusées, se déterminer sur le stade de développement en regard de la vulnérabilité de l'espèce et sur la provenance des poissons. Pour se prononcer, la réflexion est orientée vers la typologie desdites rivières. Les éclusées sont générées par la restitution d'eau turbinée. Ce mode d'exploitation ne peut être pratiqué que sur les aménagements équipés d'un bassin d'accumulation. Baumann & al (2003) relèvent que les cours d'eau suisses soumis aux éclusées s'écoulent principalement dans les fonds de vallées alpines et préalpines de taille moyenne à importante. Selon la classification établie par Huet (1949), ils se situent entre la zone à truite et à ombre. L'auteur a subdivisé le cours d'une rivière en zones piscicoles étagées selon la présence dominante de certaines espèces en fonction de leurs besoins écologiques. Il identifie ces zones en fonction de la pente longitudinale, de la largeur du lit, de la vitesse courante et de la température moyenne de l'eau. En l'occurrence les pentes longitudinales concernées sont comprises entre 4 et 8 pour mille. Le choix de la truite fario par rapport à l'ombre pour la présente recherche, résulte de la plus grande disponibilité de connaissances sur la biologie et le comportement de cette espèce (Bone & al, 1985 ; Peter, 1987 ; Heggenes & al, 1990 ; Elliott, 1994 ; Schager & al, 2001 ; Schager & al, 2002). Un grand nombre d'auteurs reconnaissent à la truite fario le rôle de bio-indicateur de la qualité des écosystèmes aquatiques et de l'état de fonctionnement des bassins versants, notamment les juvéniles qui sont les plus fragiles et les plus sédentaires. De surcroît, elle a fait l'objet de nombreuses recherches biologiques en relation avec les éclusées (Almodovar & al, 1999 ; Scruton & al, 2003 ; Flodmark & al, 2006 ; Gouraud & al, 2008 ; Murchie & al, 2008). Finalement, les essais en rivière menés par Valentin (1995), montrent la sensibilité de la truite fario aux éclusées.

2.4.2 Densité de truites fario dans les rivières

L'un des paramètres significatifs pour la conception du canal expérimental de la Maigrauge est la densité de poissons. En effet, s'il est nécessaire de mettre en jeu un nombre de poissons important pour la représentativité de l'échantillon, il faut aussi que la surface mise à leur disposition soit comparable avec leur espace vital. Dans ce but, des informations ont été recherchées au sujet des densités de poissons rencontrées dans les rivières. Dans le cadre du projet Fischnetz, Schager & al (2001) ont examiné par investigations, l'état biologique de 97 sites répartis sur 46 rivières suisses de toutes tailles, en se focalisant sur les populations de truites fario. L'ensemble des poissons recensés est réparti sur 21 espèces. Avec 53% de cet effectif la truite fario est l'espèce dominante, suivie du chabot qui représente 27% (Schager & al, 2007). La densité de truites fario va de 17 à 26'651 individus par hectare, avec une médiane à 2'537. En isolant les jeunes de l'année, la densité est comprise entre 10 et 22'589 individus par hectare, avec la médiane à 1'196. De plus il est remarqué que les truites fario jeunes de l'année sont plus densément présentes dans les petits cours d'eau. Cette observation est recoupée par d'autres études comparables, notamment Baran & al (1993). Ces importants résultats justifient la densité de 1 à 2 individus par m² qui est retenue pour le dimensionnement du canal expérimental dont il sera question au chapitre 3.

2.4.3 Stade juvénile et origine sauvage

A propos du stade de développement, Valentin (1995) relève que les juvéniles sont potentiellement plus vulnérables que les adultes. La densité des populations adultes est totalement dépendante de l'effectif des juvéniles (Orth, 1987). Il est généralement considéré que leur survie est conditionnée par des vitesses de courant très faibles. Moore & al (1988) soulignent à cet égard l'importance des zones latérales.

Concernant l'origine des truites, cette question revêt une certaine importance en relation avec la facilité d'approvisionnement pour l'expérimentation en canal. Les essais comparatifs effectués en canal par Valentin (1995) ont montré que les truites sauvages ont une activité et une résistance supérieures à celles d'élevage par débit constant alors que les différences ne sont pas flagrantes sous régime d'écluse. Certains essais en petite rivière (Berg & al, 1991) confirment cette observation pour les débits constants, alors que d'autres, réalisés en canal à faible vitesse (Greenberg, 1992) ne montrent pas de différences significatives. En situation d'écluse, l'apathie des truites juvéniles d'élevage a également été constatée lors des premiers essais effectués dans le canal expérimental. Il ressort de cet aperçu que, pour la représentativité des essais face aux conditions naturelles, il est incontournable de recourir à des poissons sauvages.

2.4.4 Performance de nage

Différents niveaux d'activité natatoire sont à considérer (Larinier & al, 1999), soit l'activité de croisière, de sprint et d'endurance. Les paramètres significatifs de cette distinction sont la vitesse de nage et la durée de l'effort, propres à chaque espèce. Ils varient en fonction de la longueur du poisson et de la température de l'eau. Concernant la truite fario, un individu de 0.20m de longueur nage à une vitesse de pointe de 1.5 m/s pendant 15 secondes, quand la température est de 5°C. A 18°C, il peut atteindre une vitesse de pointe de 3 m/s mais pendant 3 secondes seulement (Beach, 1984). Concernant la vitesse de croisière, elle est estimée entre 0.5 et 1.0 m/s pour la truite fario, selon sa longueur (Baxter, 1969). Pour le calcul de la distance de nage il faut bien sûr tenir compte de la vitesse du courant et de la direction de nage. Par exemple, dans de l'eau à 10°C, un salmonidé de 0.25m de longueur peut remonter sur 10m un courant de 1.2 m/s, et sur 100m quand la vitesse est de 0.5 m/s.

2.4.5 Déplacement des poissons le long des berges et à proximité du fond

Le refuge latéral s'inscrit comme habitat de survie des poissons. Il trouve son plus grand intérêt dans les cours d'eau pauvres en structures protectrices dans le lit même. Son accessibilité repose sur l'hypothèse selon laquelle le poisson se déplace vers les bords en cas de vitesses excessives dans la partie dynamiquement active du lit. A cet endroit, il trouve des conditions de vitesses du courant modérées. Il est donc impératif de valider l'hypothèse susmentionnée par des références bibliographiques. Concernant la position des poissons en cas de fortes vitesses d'écoulement, une confirmation est également recherchée au sujet de leur rabattement dans la partie inférieure de la colonne liquide, à proximité du fond. Cette information est nécessaire pour la mesure des vitesses d'écoulement à la profondeur où nagent les poissons.

Concernant ses exigences, la truite fario est reconnue pour sa préférence des habitats situés près des berges (Baglinière & al, 1985). Le bon accomplissement de son cycle vital est dépendant de la diversité et de la connectivité des habitats (Baran & al, 1997). Durant l'hiver, elle se réfugie dans les zones abritées à faible courant (Cunjak & al, 1986). Peter & al (2004) précisent que les juvéniles de salmonidés et de cyprinidés occupent les zones peu profondes, protégées du courant, proches des berges.

D'un point de vue hydraulique, ce positionnement à proximité du fond et des berges se situe dans les parties périphériques de la section d'écoulement appelées couches limites, où le gradient de la vitesse d'écoulement est fort (Carlier, 1972). Il faut y voir une réaction du poisson dans sa recherche instinctive de vitesses réduites (Peter & al, 2004). L'épaisseur de cette zone proche du fond est de l'ordre de 20% de la hauteur d'eau (Graf & al, 1993), pour un écoulement permanent, unidirectionnel et uniforme en moyenne. Pour les essais menés en

canal expérimental, la hauteur d'eau est de 0.25m en moyenne. En l'occurrence, ladite épaisseur est donc de 0.05m environ.

Concernant la profondeur de nage en situation d'éclusee, une interprétation intéressante peut être tirée de l'évolution de la modélisation des habitats avec PHABSIM-Physical Habitat Simulation System. Si à l'origine, la vitesse moyenne était considérée comme représentative des habitats, elle a été remplacée par la vitesse sur le nez du poisson (Milhous & al, 1989). Cette distinction vise à tenir compte de la réduction de la vitesse à proximité du fond (Milhous, 1999). Or, il est reconnu que la vitesse moyenne apparaît théoriquement à 40% de la hauteur d'eau, soit déjà dans la couche inférieure de l'écoulement. Implicitement, cette évolution révèle la volonté de prendre en compte la position du poisson en profondeur. D'autre part, Valentin (1995) a observé la position de truites fario juvéniles dans le cadre d'essais en canal. Durant la phase d'acclimatation, les poissons se répartissaient dans l'espace disponible. Ils se tenaient le plus souvent dans la moitié inférieure de la colonne d'eau en nage statique. Durant les phases d'éclusees, ils se rapprochaient du substrat, souvent en nage statique ou carrément posés sur le fond pour s'abriter derrière des cailloux. Le cas de nage statique donne une indication importante sur la profondeur à laquelle la vitesse du courant équivaut à la vitesse de croisière du poisson. D'après Blaxter (1969), cité par Larinier & al (1998), cette vitesse de croisière est estimée entre 2 et 3 fois la longueur du poisson par seconde, ce qui équivaut à environ 0.3 à 0.6 m/s pour un juvénile de 0.15 à 0.20m de longueur. Cet ordre de grandeur sera exploité pour définir la profondeur à laquelle effectuer les mesures de vitesses d'écoulement dans les sections de contrôle du canal expérimental.

2.4.6 Températures requises par la truite fario

Concernant la sensibilité de la truite fario à la température, elle varie avec son stade de développement. Pour la reproduction, des températures entre 0 et 13°C sont favorables. La température optimale pour le frai se situe à 7°C, les limites inférieures et supérieures varient selon les différentes études (Elliott 1994; Jungwirth & al. 2003). Le taux de mortalité augmente significativement à des températures supérieures à 12°C et inférieures à 0°C. Les juvéniles se sentent à l'aise à des températures comprises entre 6 et 14°C (Küttel & al, 2002). La température optimale pour les adultes se situe à 12°C (Jungwirth & al, 2003). La limite supérieure de température supportable est liée à l'approvisionnement en oxygène. A partir d'environ 25°C, l'apport d'oxygène devient insuffisant (Jungwirth & al, 2003).

2.4.7 L'ablation de la nageoire adipeuse n'affecte pas le comportement du poisson

Pour la conduite des essais en canal expérimental, il a paru judicieux de subdiviser chaque lot de poissons en 2 groupes. De cette façon, les groupes sont sollicités successivement avec l'intention de maintenir un long temps de repos. Pour différencier les individus de chaque

groupe, un marquage est donc nécessaire. En pareil cas, la technique de l'ablation de la nageoire adipeuse est prescrite. Pratiquée sur l'effectif d'un groupe, elle permet une bonne distinction visuelle, ce d'autant plus qu'elle ne repousse pas. L'adipeuse est une petite nageoire dorsale située entre la principale et la queue. Champigneulle & al (1984) ont procédé au suivi systématique de truites fario juvéniles. Ils ont pu constater que ni la croissance, ni la survie ne sont significativement affectées, par l'ablation de la nageoire adipeuse.

2.4.8 Préférence d'habitats de la truite fario

Valentin (1995) a étudié la sensibilité aux éclusées de l'ombre commun et de la truite fario, par des mesures et observations en rivière. Dans sa recherche, elle invoque l'atteinte portée aux habitats dans les rivières soumises aux éclusées. En termes de modélisation, l'habitat des rivières est communément transcrit par 3 paramètres de l'écoulement, une vitesse représentative du courant, la hauteur d'eau et la granulométrie du substrat. Si initialement ladite vitesse était la valeur moyenne dans la section, la référence courante est maintenant la vitesse sur le nez du poisson (Milhous, 1989). La modélisation des habitats permet d'évaluer, en fonction du débit, l'évolution de l'habitat physique d'une portion de rivière pour quelques espèces de poissons cibles. Le principe de base est de coupler une information physique, qui décrit l'habitat, et une réponse biologique qui va permettre d'en apprécier la qualité (Ginot & al, 1998). A cet égard, il convient de citer les modèles PHABSIM (Bovee, 1982), ESTIMHAB (Souchon & al, 2003) et CASIMIR (Schneider, 2001), entre autres.

Dans le cadre des essais pour le développement de refuges latéraux, l'intérêt envers cette méthodologie de modélisation se limite à la préférence d'habitat exprimée par les 3 variables que sont la vitesse, la hauteur d'eau et la granulométrie du substrat. Chacun d'eux est associé à la sensibilité du poisson par des courbes de préférence individuelles. Un indice de préférence peut alors être déterminé en fonction de la valeur d'un paramètre. L'indice varie de 0 pour la préférence minimale, à 1 pour la meilleure. Si le terme préférence suggère l'appréciation du degré de confort, il faut bien comprendre qu'il est plutôt question de survie. En situation d'éclusées, l'analyse de ces courbes pousse à constater que les 3 variables de l'habitat deviennent défavorables dans les rivières affectées, surtout pour les jeunes poissons (Anderson & al, 1985). Dès l'apparition de ces courbes, il a été recommandé de les établir pour le milieu concerné plutôt que de recourir à des résultats issus de la littérature (Bartz, 1990). Depuis lors, les recherches se sont multipliées sur le sujet et une grande diversité de courbes est disponible pour les espèces caractéristiques à leurs différents stades de développement. Dans le cadre d'une telle opération pratiquée sur la rivière Adda en Italie du Nord (Vismara & al, 2001), une synthèse des courbes produites par 9 auteurs a été produite pour la truite fario aux stades de juvénile et d'adulte (Belaud & al, 1989 ; Bovee, 1978 ; Chaverocche & al, 1987 ; Fragnoud, 1987 ; Heggenes & al, 1990 ; Lambert & al, 1987 ; Raleigh & al, 1986 ; Smith & al, 1987 ; Studley & al, 1992).

Concernant le stade juvénile, particulièrement intéressant pour les essais prévus dans le cadre du présent projet de recherche, les courbes extraites de Vismara & al (2001) sont reproduites telles quelles sur la figure 2.1. Globalement, l'indice de préférence des vitesses vaut 1.0 pour la valeur de 0.1 m/s et tombe à 0.2 pour des valeurs de 0.4 à 0.6 m/s, pour tendre vers 0 au delà. Les courbes ont toutes la même allure générale. Concernant la hauteur d'eau, la préférence maximale est obtenue quand elle atteint 0.2 à 0.4m. Une réduction de l'indice est observée au delà de 0.6m. Quant à la granulométrie du substrat, les graviers sont les plus appréciés par les juvéniles de truites fario, contrairement aux sédiments fins. Le canal expérimental sera construit de sorte que la vitesse imposée aux poissons dépasse 0.8 m/s pour reproduire une situation stressante, assimilée à celle qui peut prévaloir en situation d'éclusee. La hauteur d'eau sera comprise entre 0.2m et 0.4m et le substrat sera plutôt fin afin d'être inhospitalier pour l'immobilisation des poissons.

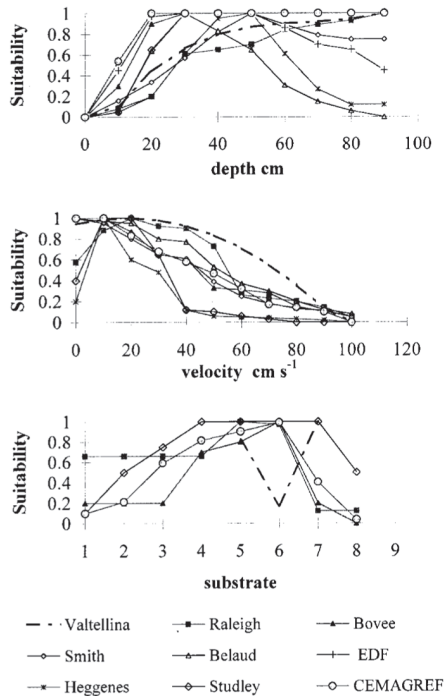


Figure 1.2: Extrait de Vismara & al (2001) donnant une comparaison entre les courbes de préférence d'habitat de la truite fario au stade juvénile établies pour la Valtellina, et celles sélectionnées de la littérature, pour la hauteur d'eau, la vitesse du courant et la granulométrie du substrat (Classification de 1 = colloïdes à 7 = pierres, avec 4 = sables, 5 = graviers et 6 = galets).

2.4.9 Les truites fario du Tannenbach à Büttisholz

Lors de la sélection d'un lieu de pêche des poissons pour les expériences en canal, l'un des critères de choix du Tannenbach était la disponibilité d'informations sur le site. Dans le cadre du projet Fischnetz (2004), cette rivière figure à l'inventaire des 59 stations documentées sur l'ensemble de la Suisse concernant la truite fario (Schager & al, 2001). Les éléments suivants peuvent être mentionnés. Le Tannenbach, affluent de l'Aar est un cours d'eau du 2^{ème} ordre sur l'échelle hydrographique de Strahler (1957), située dans la zone à truites selon la nomenclature de Huet (1949). Le village de Büttisholz (Coordonnées nationales 648'400/218'350, altitude 550m) est situé à proximité de Sursee, non loin de Lucerne. A cet endroit le lit du Tannenbach a une largeur de 1.35 à 2.5m et la granulométrie de son substrat s'étend entre 2.0 et 6.3 cm, sans colmatage. Sur le tronçon de 100m étudié en 2000, le lit est composé de 75% de rampes et 25% de plats, sans mouille. Sous une hauteur d'eau moyenne de 0.19m la densité de truites fario s'élève à 16'762 individus par hectare, pour une biomasse de 346 kg de poissons par hectare. La largeur du canal expérimental, la hauteur d'eau et la densité de poissons introduits sont inspirées de ces valeurs.

2.5 Résumé des informations acquises

2.5.1 Informations relatives aux éclusées

La revue bibliographique a permis de confirmer que la problématique des éclusées affecte les cours d'eau récepteurs des eaux turbinées dans les aménagements hydroélectriques à accumulation. Les modifications des régimes hydrologique et thermique des cours d'eau sont aujourd'hui reconnues comme dommageables pour la faune subaquatique. Si la recherche a déjà produit de bonnes connaissances sur les causes et conséquences des dommages induits par les éclusées, le développement de mesures d'atténuation est maintenant à l'étude.

2.5.2 Informations relatives à la truite fario

La truite fario au stade juvénile et à l'état sauvage, est une espèce représentative des cours d'eau soumis aux éclusées. Elle est à l'aise dans des écoulements à vitesses inférieures à 0.2 m/s et dans l'intervalle de température compris entre 6 et 14°C. Elle est menacée quand la vitesse persistante du courant dépasse 0.8 m/s. Dans ce cas, son habitat de survie est confiné vers les berges et sur le substrat du lit. Le refuge latéral s'inscrit comme une mesure de renforcement des habitats de survie en offrant des conditions protectrices face aux vitesses excessives dans la partie active du cours d'eau. Les truites utiles aux expérimentations en canal seront prélevées au Tannenbach.

2.5.3 Informations relatives aux essais avec des poissons

Si les observations en rivières constituent la base pour le constat des dysfonctionnements et la validation des mesures, les expérimentations en canal sont adoptées pour des essais systématiques et pour l'obtention d'informations paramétriques. Considérant le repli des poissons en cas de menace, il suffit de reproduire la partie latérale au voisinage de la berge, dans le canal expérimental. Dans le canal à construire avec un refuge latéral, les vitesses doivent être supérieures à 0.8 m/s dans l'écoulement principal et inférieures à 0.2 m/s dans les zones de repos du refuge. Les périodes d'essais sont définies par la température de l'eau.

2.5.4 Conclusions de la recherche bibliographique

En réponse aux objectifs, la recherche bibliographique a permis de définir le cadre de cette recherche et de rassembler les informations utiles à sa justification. De plus, elle contient les critères et les ordres de grandeur pour le montage du dispositif expérimental et pour fixer les conditions d'essais. Sur cette base, la méthodologie de la recherche peut être établie. C'est l'objet du chapitre 3.

3 METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

3.1 Procédures, démarche, organisation

L'objectif de cette recherche est de comprendre et par la suite d'influencer, le comportement de poissons soumis à des conditions hydrauliques qui leur sont dommageables, de manière à les attirer vers une zone sécurisée. Différentes approches sont a priori envisageables, telles que la simulation numérique, les mesures en rivière et l'expérimentation en canal.

La simulation numérique présente l'avantage du faible investissement en équipements et de la rapidité de traitement. S'il existe des modèles hydrodynamiques très évolués pour la simulation numérique du refuge imaginé, il n'en va pas de même pour le comportement des poissons. En effet, la modélisation des habitats donne une information sur la capacité d'accueil du cours d'eau à un certain débit, mais ne renseigne pas sur la dynamique du poisson. Actuellement, des recherches se penchent sur la réponse de poissons à certaines sollicitations, ainsi que sur les techniques de traitement d'images pour en saisir le détail (Deng & al, 2004), sans encore déboucher sur une modélisation opérationnelle. Il n'est donc pas possible pour l'instant d'étudier l'attractivité du refuge latéral par simulation numérique. Par contre la simulation hydrodynamique se révèle utile pour déterminer les champs de vitesses traversés par les poissons.

Concernant les mesures en rivière, elles ne peuvent pas être entreprises sans qu'une solution soit préalablement élaborée. En effet, dans la phase expérimentale le processus de développement est évolutif. De plus il faut pouvoir isoler certains éléments du concept pour en voir l'influence. Enfin les contraintes opérationnelles sont très lourdes et coûteuses. Il n'était dès lors pas envisageable de procéder directement par une expérimentation en rivière. Par contre, il a d'emblée été admis que des essais en rivière du prototype de refuge élaboré en laboratoire était la seule façon de valider la solution. Il en sera donc ainsi dans le prolongement de la présente recherche.

Finalement c'est la méthode expérimentale qui s'impose, par le fait que des poissons sont mis en jeu. La pertinence et l'intérêt de la méthode par expérimentation en canal ont été relevés dans la revue bibliographique (Bouchard, 2003 ; Silva & al, 2010 ; Valentin, 1995). Les objectifs et la procédure de la recherche expérimentale sont présentés dans le tableau 3.1.

Objectif	Procédure	Moyens
Soumettre le poisson à des conditions d'écluée.	Définir les conditions hydrauliques et biologiques à reproduire sur le modèle. Etablir le projet de l'installation.	Construire un canal avec un refuge latéral, alimenté en eau de rivière.
Attirer le poisson dans le refuge	Trouver un principe simple d'aménagement capable d'attirer le poisson vers le refuge.	Développer un courant d'attrait sortant du refuge. Tester le concept avec des poissons.
Maximiser la fréquentation du refuge	Générer plusieurs configurations découlant du principe de base.	Mettre des groupes de poissons en situation d'écluée. Tester les différentes configurations avec des poissons.
	Compter le nombre de poissons présents dans le refuge, au cours du temps.	
	Etablir le classement des configurations selon leur taux de fréquentation.	Simulations numériques avec SSIIM-3D, puis avec Basement-2D.
	Calculer les débits échangés entre le canal et le refuge.	
Comprendre le comportement du poisson.	Rechercher des corrélations entre le taux de fréquentation et les débits échangés ou d'autres paramètres élémentaires.	
	Examiner les trajectoires	Filmer les mouvements des poissons au voisinage du refuge, restituer les trajectoires.
	Définir des sections de contrôle, les décomposer en cellules. Compter le nombre de passage dans chaque cellule des sections de contrôle, établir les diagrammes de préférence.	Examiner les possibilités du traitement numérique des images.
Détecter les conditions hydrauliques attractives	Mesurer les vitesses dans les cellules des sections de contrôle. Etablir les profils de vitesses.	Sélectionner la technique de mesures de vitesses appropriée, LSPIV, UVP. Recouper les valeurs avec des mesures au micromoulinet.
	Etablir globalement la relation entre les vitesses d'écoulement et la préférence de passage des poissons dans les sections de contrôle.	Constituer des couples coïncidants de valeurs de vitesses et de nombres d'entrées, le long de l'interface entre le canal et le refuge.
Produire des consignes de dimensionnement	Mettre en évidence les éléments dominants du système, y associer des paramètres et leurs grandeurs.	Etudier les corrélations entre le taux de présence des poissons dans le refuge et les paramètres du refuge.

Tableau 3.1: Objectifs de la recherche, procédures suivies pour les atteindre et moyens mis en oeuvre.

3.2 Installation expérimentale

3.2.1 Critères et ordres de grandeur pour le projet du canal d'écluesées

Le premier défi de cette recherche est la construction d'un canal expérimental, capable de reproduire des conditions d'écluesées et de contenir des poissons dont le comportement reste comparable à celui prévalant dans une rivière. Les contraintes qui découlent de ces exigences sont examinées ci-après.

Echelle de modélisation et largeur du canal : S'agissant de mettre en activité des poissons, il n'est évidemment pas possible de travailler à échelle réduite. Dès lors, le canal expérimental doit représenter la vraie grandeur. La reproduction du lit d'une rivière sur toute sa largeur n'étant pas raisonnable, la largeur du canal doit être limitée tout en restant représentative. Cet objectif est respectable du point de vue du poisson, sachant qu'il se déplace le long des berges en situation de menace (voir chapitre 2.4.5). Du point de vue hydraulique, il sera démontré au chapitre 4.2.2 par des simulations numériques, que le profil horizontal de vitesses dans le canal est sur une largeur d'un mètre à compter de la paroi, très semblable à celui d'un canal beaucoup plus large. Il est donc acceptable de ne reproduire que la rive droite d'une rivière de grande largeur, sur une largeur supérieure ou égale à 1.0 m.

Surface au sol du canal : Les dimensions en plan doivent être en accord avec la densité de population des poissons. En milieu naturel, cette densité est estimée entre 1 à 2 poissons par m^2 dans un petit cours d'eau (voir chapitre 2.4.2) pour la truite fario au stade juvénile. Par compromis entre la représentativité des résultats et le maintien en bonne forme des poissons durant toute la période de captivité, le nombre d'individus présents sur le site a été fixé à une vingtaine de truites. En conséquence, la surface utile du canal doit être supérieure à $10 m^2$.

Dimensions du refuge : Dans un espace confiné où la vitesse du courant est faible, les poissons s'immobilisent en groupe dans les zones de tourbillons et réduisent leurs mouvements. Leur densité de population est de ce fait augmentée. Selon Arrignon (1998), 5 à 10 poissons peuvent se tenir dans $1 m^2$. En conséquence, la surface utile du refuge doit être supérieure à $2 m^2$.

Vitesses d'écoulement dans le canal principal : S'agissant de créer des conditions d'écluesées, les paramètres hydrauliques significatifs sont les hauteurs d'eau et les vitesses élevées dans le canal principal. Le refuge étant présenté comme un palliatif aux fortes vitesses d'écoulement, ce sont donc ces dernières qui doivent être maintenues durant les essais. Les courbes de préférence présentées au chapitre 2.4.8, montrent un fléchissement de l'indice pour des vitesses de 0.5 à 0.6 m/s et des valeurs inférieures à 0.2 lorsque les vitesses dépassent 0.8 m/s, voire inférieures à 0.1 pour des vitesses supérieures à 1.0 m/s. Ce paramètre est considéré

comme le plus important de la présente recherche, raison pour laquelle le canal est conçu de manière à pouvoir respecter ces ordres de grandeur.

Hauteurs d'eau : Bien que jugée importante pour la qualification de l'habitat d'un cours d'eau, la hauteur d'eau persistante en cas d'écluses, doit être maintenue dans la plage que préfèrent les poissons, de sorte qu'elle ne constitue pas une variable. Se référant aux courbes de préférence (voir chapitre 2.4.8), cette dernière devient bonne dès que la hauteur d'eau dépasse 0.2m.

Débit d'écluse : La juxtaposition des différentes valeurs minimales susmentionnées permet de déterminer le débit qui doit être disponible pour générer des écluses. Ce dernier doit donc être supérieur ou égal à 200 l/s, afin de maintenir une vitesse moyenne supérieure à 0.8 m/s dans le canal principal.

Substrat : Le substrat préféré des poissons constitue de fait un abri dans lequel le poisson peut s'immobiliser en cas de danger. Toujours dans l'idée de n'étudier que le refuge, un substrat inhospitalier, par exemple un mortier couvrant et réglé, doit être mis en place sur le fond du canal. Dans le refuge par contre, un substrat non jointif, constitué d'un mélange de 2/3 de gravier rond diamètre 16 à 32 mm et de 1/3 de cailloux roulés diamètre 30 à 60 mm est prescrit.

Qualité de l'eau : Afin de pouvoir compter sur un comportement qui ne soit pas modifié par les conditions de captivité, la qualité de l'eau doit être conforme à celle qui s'écoule en rivière. L'option d'une installation alimentée continuellement en eau de rivière doit de ce fait prioritairement être examinée.

Eclairage : Afin que le comportement des poissons ne soit pas influencé par l'intensité de la lumière il est souhaitable que l'éclairage puisse être contrôlé et maintenu à l'état de pénombre, comparable à celui du soleil filtré à travers le dense feuillage de la végétation riveraine d'un cours d'eau naturel.

S'agissant de répondre à tous les critères et ordres de grandeur retenus, la conception et la réalisation de l'installation expérimentale ont été dictées par les éléments suivants, présentés en ordre de priorité.

3.2.2 Choix du site

A la recherche d'une eau courante naturelle, les canaux du Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'EPFL n'ont pas pu être utilisés du fait de la qualité précaire de l'eau qui s'écoule en circuit fermé. La recherche de site s'est tout d'abord orientée vers les canaux

usiniers très nombreux le long des rivières. En principe, ces canaux sont précédés d'un petit barrage, d'un dessableur et d'une vanne de régulation. Dans la plupart des cas, le renoncement a résulté d'un antagonisme. Si l'aménagement est en bon état, c'est qu'il est en exploitation et dans ce cas les impératifs de production sont incompatibles avec ceux des essais envisagés. Cette démarche prospective a trouvé son aboutissement par l'accueil favorable du Groupe-E pour l'installation d'un canal expérimental à l'usine hydroélectrique de la Maigrauge.

L'ancienne usine hydroélectrique de la Maigrauge, à Fribourg (Suisse), est attenante au barrage du même nom, qui retient passagèrement les eaux de la Sarine dans le lac de Pérolles (Figure 3.1a). Réalisé en 1869-1870 par l'ingénieur Guillaume Ritter (1835-1912), le barrage est le premier construit en béton en Europe (Lauper & al, 2006). L'usine alimentée par l'eau du lac, produisait initialement de l'énergie mécanique de rotation. Les turbines entraînaient un jeu de câbles et poulies pour transporter cette énergie téléodynamique sur le site industriel de Pérolles (Ponzo, 1978). L'apparition de l'électricité ruina cette installation et Ritter lui-même, qui en était le principal investisseur. Profitant de la sinuosité très marquée de la Sarine à cet endroit, l'eau du lac est depuis lors, acheminée dans une galerie qui coupe le méandre, vers l'usine de l'Oelberg. Quant à l'usine de la Maigrauge (Figure 3.1b), elle renferme une turbine qui récupère l'énergie induite par l'écoulement du débit de dotation de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, pour le tronçon de la Sarine compris entre le barrage de la Maigrauge à la restitution de l'Oelberg. Depuis sa rénovation en 1995, un ascenseur à poissons précédé d'une échelle, y est installé.

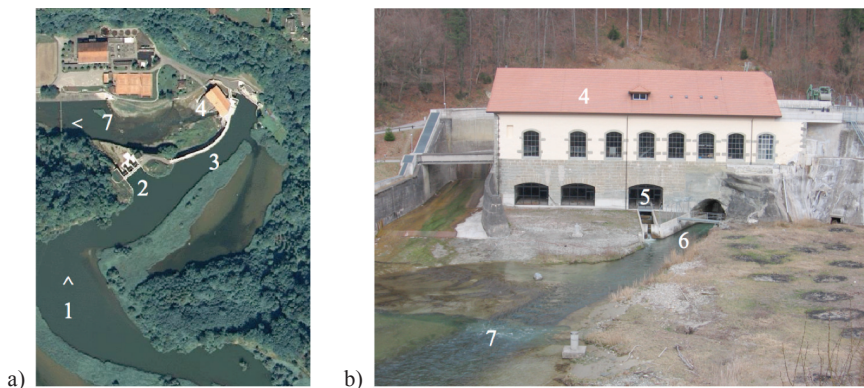


Figure 3.1: a) Vue aérienne de l'aménagement hydroélectrique de la Maigrauge à Fribourg (Suisse). b) Vue de l'ancienne usine hydroélectrique de la Maigrauge depuis l'aval du barrage. 1. Lac de Pérolles sur la Sarine ; 2. Evacuateur de crues ; 3. Barrage ; 4. Ancienne usine contenant la turbine de dotation, l'ascenseur à poissons et le canal expérimental ; 5. Echelle d'attrait menant à l'ascenseur à poissons ; 6. Restitution du débit de dotation ; 7. Sarine à débit résiduel.

Pour favoriser la montaison du poisson, un débit d'attrait de 400 l/s est prélevé dans le lac de Pérolles et acheminé par une colonne verticale, au pied de l'ascenseur. L'idée est venue de détourner une partie de ce débit pour alimenter un canal d'écluses à construire dans le grand espace libre disponible à l'intérieur de l'usine. Groupe-E SA, propriétaire de l'aménagement, et intéressé par le développement de refuges à poissons, a réservé un bon accueil à la demande d'installation de notre canal expérimental.

Par le choix de ce site, les questions de débits, de qualité de l'eau et de contrôle de l'éclairage sont idéalement résolues. De fait, les inconvénients induits par la turbidité de l'eau en période de pluies et le transit de feuilles en automne sont apparus acceptables.

3.2.3 Alimentation en eau

Le propriétaire de l'aménagement hydroélectrique de la Maigrauge étant tenu à l'obligation de garantir l'écoulement d'un débit d'attrait de 400 l/s en permanence, l'autorisation de détournement d'une partie de ce débit a été donnée à condition que la circulation d'eau ne soit pas entravée. Il fallait donc concevoir un dispositif qui permette de prélever l'eau dans la colonne verticale, de la faire transiter dans le canal expérimental puis de la restituer dans la même conduite (Figure 3.2).

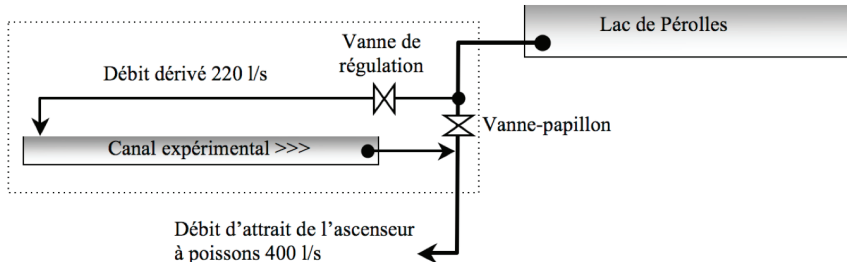


Figure 3.2: Schéma hydraulique de l'installation. Le rectangle en pointillé indique l'emprise de l'installation expérimentale réalisée pour cette recherche.

La solution développée est caractérisée par l'installation d'une vanne papillon entre les points de prélèvement et de restitution d'eau. En position semi-ouverte, le portillon produit la mise en charge de la colonne amont, et une dépression par décollement, en aval (Figure 3.3a).

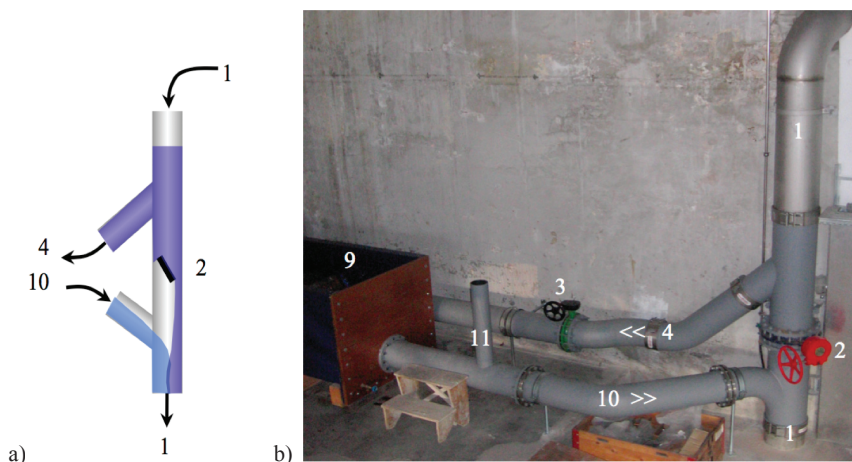


Figure 3.3: Détail de l'organe de dérivation et de restitution d'eau pour l'alimentation de l'installation expérimentale. a) Schéma explicatif du rôle de la vanne-papillon - b) Photo de la tubulure en place. 1. Conduite d'acheminement du débit d'attrait vers le pied de l'ascenseur à poissons, diamètre 500 mm ; 2. Vanne-papillon ; 3. Vanne de régulation pour générer les éclusées ; 4. Conduite d'alimentation du canal expérimental, diamètre 300 mm ; 9. Sortie du canal expérimental ; 10. Conduite de restitution ; 11. Ventilation de la conduite de restitution.

3.2.4 Eléments constitutifs

Une fois dérivée de la conduite d'attrait, l'eau est acheminée vers le canal d'essais par une conduite en charge de 300 mm de diamètre sur une longueur de 15m (Figure 3.4). Le débit d'éclusées de 220 l/s s'y écoule avec une vitesse moyenne de 3.1 m/s, occasionnant une perte de charge inférieure à 1m. La vanne de régulation placée juste en aval du branchement permet de varier et d'établir le débit d'éclusée. Celui-ci est mesuré à l'aide d'un débitmètre à ultrasons appliqué à l'extérieur et à mi-longueur de la conduite d'alimentation. Ladite conduite débouche en tête du canal, dans la zone de tranquillisation. Une double tubulure perforée, posée sur le fond, lui donne suite afin de distribuer l'eau sur la largeur du canal (Figure 3.6a). Cette distribution est ensuite affinée par le passage à travers une grille transversale et verticale, qui est par ailleurs nécessaire pour limiter l'espace de nage des poissons. C'est pourquoi ses mailles ont une ouverture de 1 par 1cm. Cette grille marque l'entrée effective du canal (Figure 3.5), qui s'étend sur une longueur rectiligne de 12 m, pour une largeur de 1.2 m, entre les parois verticales. Il se termine par une grille de même structure que celle placée à l'entrée, avant de libérer l'eau dans la cuve de sortie. A cet endroit, la surface libre reste inférieure au pied de la grille. De cette cuve, l'eau s'engouffre dans la conduite de restitution raccordée à la colonne verticale qui se termine au pied de l'ascenseur à

poissons. Dans la conduite de restitution l'écoulement à surface libre est maintenu par l'aspiration d'air rendue possible grâce à la présence d'un tube vertical (Figure 3.3b).

Le canal est construit avec 5 éléments en polyester d'une longueur de 2m chacun. Les bacs d'entrée et de sortie du canal, ainsi que le refuge, sont construits avec des parois verticales en bois marin fixées sur des plaques de base en polyester. Les parois du refuge qui sont parallèles à l'axe du canal sont vitrées, pour l'observation des poissons.

Les dimensions du canal expérimental sont données sur la figure 3.4. Les conditions hydrauliques sont précisées au chapitre 3.2.6.

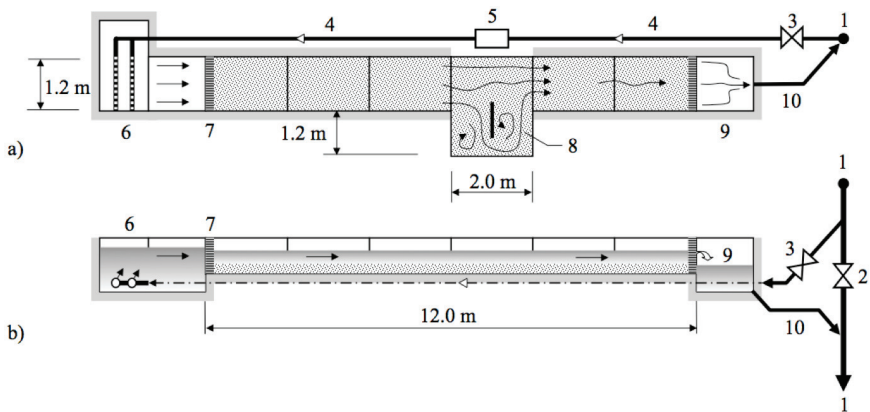


Figure 3.4: Représentation du canal expérimental de la Maigrauge. a) Vue en plan. b) Profil longitudinal. 1. Conduite d'acheminement du débit d'attrait vers le pied de l'ascenseur à poissons, diamètre 500 mm ; 2. Vanne-papillon ; 3. Vanne de régulation pour générer les éclusées ; 4. Conduite d'alimentation du canal expérimental, diamètre 300 mm ; 5. Débitmètre ; 6. Rampe de répartition de l'eau sur la largeur du canal ; 7. Grille de tranquillisation à l'entrée du canal ; 8. Refuge latéral avec la paroi de dérivation ; 9. Grille aval et sortie du canal expérimental ; 10. Conduite de restitution ; 11. Ventilation de la conduite de restitution.

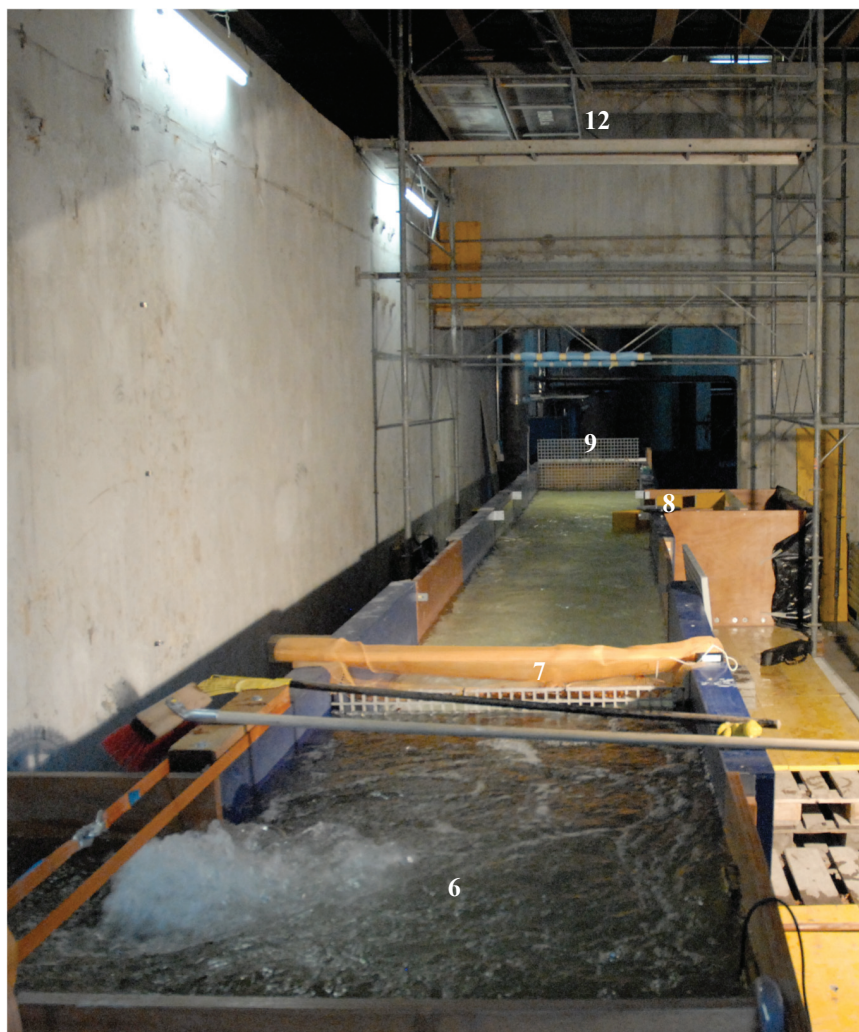


Figure 3.5: *Vue d'amont du canal expérimental. 6. Bassin d'entrée du canal contenant le dispositif de répartition du débit sur la largeur du canal ; 7. Grille de tranquillisation à l'entrée du canal ; 8. Refuge latéral avec la paroi de dérivation ; 9. Grille marquant la sortie du canal expérimental ; 12. Plate-forme d'installation de la caméra vidéo à l'aplomb de la zone du refuge.*

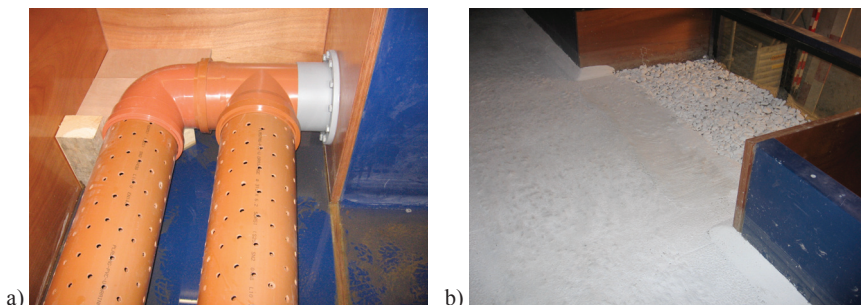


Figure 3.6: Canal expérimental de la Maigrauge. a) Dispositif de répartition du débit sur la largeur du canal. b) Vue du canal dans le secteur du refuge avec sa vitre d'observation des poissons, le fond blanchi avec substrat colmaté au mortier dans le canal, substrat brut dans le refuge, pied des parois verticales façonné à 45° dans le canal. Conduites et vannes d'alimentation, rampe de distribution à l'entrée, refuge latéral. Le canal construit avec des éléments en polyester d'une longueur de 2 m chacun, comprend une surlargeur unilatérale de 1.2 m sur une longueur de 2 m, à 6 m de l'entrée le long de la paroi droite. Cet espace rectangulaire constitue la zone du refuge. Pour l'observation des poissons ses parois sont en partie vitrées.

3.2.5 Substrat et revêtement

Dans l'idée de créer un contexte pseudo naturel, le substrat du canal et du refuge était initialement constitué d'un mélange de 2/3 de gravier rond 16 à 32 mm et 1/3 de boulet 30 à 60 mm, aplani et compacté bord à bord. Cette sélection correspond aux courbes de préférence de substrat pour la truite fario juvénile (Vismara & al, 2001). Cette intention initiale a été remise en question dès les premiers essais, où l'immobilisation des poissons dans le substrat fut observée. Bien que cet effet soit bienvenu pour la survie des poissons, des signes d'épuisement s'en suivirent sous forme d'immobilité, même une fois l'éclusee passée. De plus, cette contribution du substrat contrecarre l'objectif de la recherche qui se focalise sur le refuge latéral. C'est pourquoi il fut décidé de placer le long des parois du canal une bande de dalles de jardin en béton lavé sur une largeur de 25 cm, et colmater le substrat avec du mortier dans la partie centrale (Figure 3.6b). Par la suite, un chanfrein à 45° a été façonné au pied des parois sur une hauteur de 10 cm. Quant au substrat du refuge, il a été maintenu dans sa composition initiale. Finalement toute la surface a été peinte en blanc pour des questions de contraste et de visibilité des poissons.

3.2.6 Conditions hydrauliques

Une fois le canal construit, des tests hydrauliques ont été effectués pour déterminer le débit maximum exploitable pour reproduire des conditions d’écluées. Il pu être fixé à 220 l/s. Sous cette condition, la grille de sortie impose une hauteur d’eau de 0.24m.

Une fois le substrat déposé une pente longitudinale de 0.5% a été établie, tout au long du canal. Après le colmatage du substrat au mortier, les hauteurs d’aspérité et d’ondulation du fond ont été mesurées en de nombreux points. La valeur moyenne est de 2.0 cm avec une variation ± 0.5 cm. En appliquant la formule empirique $K_s = 26/h_s^{1/6}$ établie par Müller & Meyer-Peter, la rugosité de Strickler du fond est estimée à $K_s = 50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Avec ces caractéristiques, et compte tenu de la présence du refuge latéral, les hauteurs d’eau observées en amont du refuge étaient de l’ordre de celle qui régnait au voisinage de la grille de sortie, soit 0.24m, pour le débit de 220 l/s. Le tableau 3.2 rassemble les principales valeurs hydrauliques en relation avec la section du canal (Figure 3.7). La valeur du nombre de Froude montre que l’écoulement est nettement fluvial.

Débit maximum	Hauteur d’eau	Section nette	Rayon hydraulique	Vitesse moyenne	Nombre de Froude
220 l/s	0.24 m	0.278 m ²	0.178	0.79 m/s	0.53

Tableau 3.2: Paramètres hydrauliques du canal expérimental de la Maigrauge pour la condition de débit maximum.

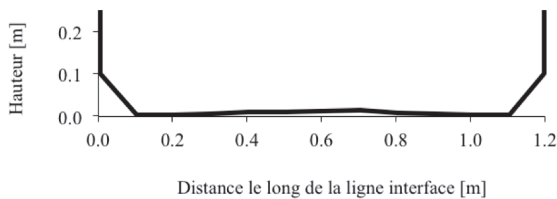


Figure 3.7: Exemple de profil transversal relevé dans le canal expérimental de la Maigrauge.

3.3 Instrumentation

3.3.1 Mesure des débits

Le débit est mesuré à l'aide d'un débitmètre à ultrasons (Krohne Ultrasonic 6300). Cet instrument est constitué de 2 émetteurs-récepteurs d'ultrasons appliqués à l'extérieur de la paroi avec une incidence de $\pm 45^\circ$ sur la conduite d'alimentation (Figure 3.8). Ils sont alignés sur l'axe d'écoulement et la distance qui les sépare correspond à la base d'un triangle isocèle-rectangle dont le sommet coïncide avec la génératrice opposée de la paroi tubulaire. Le débit est déduit du bilan des temps que mettent les signaux qui suivent les 2 cotés dudit triangle pour aller du point d'émission au point de réception et inversement. Cette distance étant identique dans les 2 sens, le signal descendant bénéficie d'une contribution favorable de la vitesse du courant, ce qui n'est pas le cas en sens inverse. Une correction est apportée pour tenir compte de l'erreur produite sur les signaux par le matériau et l'épaisseur de la paroi du tuyau. Des comparaisons faites à l'aide d'un déversoir à paroi mince installé provisoirement à la place de la grille de sortie du canal, montrent une différence relative inférieure à $\pm 2\%$. Une fois stabilisée, la valeur du débit d'éclusées est vérifiée toutes les 20 minutes sur un écran indicateur.

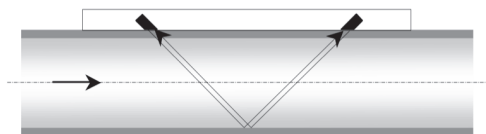


Figure 3.8: Schéma de fonctionnement de la mesure de débit par ultrasons.

3.3.2 Contrôle de la hauteur d'eau, de la température et de la turbidité

La hauteur d'eau est enregistrée à l'aide d'une sonde à ultrasons placée à l'axe du canal, 2m en amont de la grille de sortie. Cette mesure est uniquement destinée à la vérification en cas de doute. Par contre elle ne répond pas totalement au besoin car l'instrument ne donne pas la valeur instantanée. Pour le contrôle instantané, la lecture de la hauteur d'eau est faite sur une règle limnimétrique placée contre la paroi, également 2m en amont de la grille de sortie. La consigne de 0.24m a été contrôlée toutes les 20 minutes durant les essais avec les poissons. L'attention permanente mise sur la stabilité du niveau d'eau résulte de l'encrassement de la grille de sortie par les feuilles transportées par les eaux de la Sarine.

La température de l'eau est elle aussi mesurée toutes les 20 minutes avec une aiguille thermométrique et enregistrée continuellement dans le canal et dans le lac de Pérolles, à l'aide

de capteurs-enregistreurs Vemco-Minilog. Quant à la turbidité de l'eau, elle a été mesurée initialement à l'aide d'un tube de Snellen. Par la suite cette mesure a été interrompue car la valeur de la turbidité s'avéra d'un intérêt subsidiaire. Seule la visibilité des poissons dans le refuge et en condition de pénombre a constitué de force le critère de décision pour l'interruption d'un essai.

3.4 Mise en œuvre des poissons

3.4.1 Espèce de poissons, stade de développement et provenance

Il ressort de la revue bibliographique (chapitre 2.4.1) que la truite fario au stade de développement juvénile, est un poisson représentatif de l'ensemble de la faune piscicole en présence dans les rivières alpines et préalpines. Pour cette raison, cette espèce a été sélectionnée de manière exclusive pour cette recherche. Si l'approvisionnement en pisciculture paraît a priori de bonne commodité, des essais comparatifs ont montré qu'une truite d'élevage a un comportement nettement moins vigoureux qu'une truite sauvage. Face à ces observations et prenant en compte les informations figurant au chapitre 2.4.3, il a été décidé de recourir exclusivement à des poissons sauvages (Figure 3.9).

3.4.2 Autorisation

Une phase déterminante pour la mise en œuvre de poissons est l'obtention d'une autorisation pour effectuer des expériences avec des animaux. Celle-ci est attribuée par le Vétérinaire cantonal pour une durée limitée, à une personne qui répond aux exigences de formation pour la détention d'animaux sauvages, et qui se porte garante du respect de la loi fédérale sur la protection des animaux. En l'occurrence l'autorisation est donnée à l'EAWAG pour une durée de 2 ans, à condition que le dénombrement des poissons saisis et restitués soit produit chaque année, et que les poissons soient rapportés à l'endroit où ils ont été capturés. De plus l'installation peut subir un contrôle inopiné. Implicitement, ces exigences sont respectées dans la procédure de mise en œuvre des poissons.

3.4.3 Pêche électrique et transport des poissons

Considérant l'ensemble des contraintes, il a été décidé de prélever les poissons dans le Tannenbach (Figure 3.10a), à Büttisholz (LU). Ce cours d'eau est documenté et fait l'objet d'un suivi piscicole (chapitre 2.4.9). Les pêches électriques y sont effectuées par le personnel autorisé et avec les moyens de l'EAWAG. Le principe de la pêche électrique repose sur le fait que le poisson soumis à un champ électrique subit une différence de potentiel entre la tête et la queue. Il est alors attiré vers l'anode où il s'immobilise, ce qui facilite sa capture.



Figure 3.9: *Truites fario* au stade juvénile, pêchées au Tannenbach. Longueur moyenne de 0.16m selon tableau 5.2.

L'équipement de pêche est de fait constitué d'une cathode déposée sur le fond du cours d'eau, d'une anode en forme d'un anneau métallique monté sur un manche, et d'une génératrice qui alimente le tout en courant électrique. Munis de cuissardes et de gants caoutchouc pour ne pas être électrocutés, 3 opérateurs se déplacent dans le cours d'eau en remontant le courant. L'un porte la génératrice sur son dos, l'autre immerge l'anode et le dernier prend les poissons dans son filet (Figure 3.10b). Ramenés sur la berge, les poissons sont endormis dans un bain d'essence de girofle, puis mesurés (Figure 3.10c). Afin de constituer 2 groupes distincts, la nageoire adipeuse est coupée à une moitié de l'effectif. Dépourvue de cartilage, cette petite nageoire placée à l'arrière du dos est inanimée et donc indolore. Lors de chaque saisie, une vingtaine de truites d'une longueur comprise entre 15 et 20 cm, sont pêchées puis transportées par route, vers la Maigrauge, dans un bac de 50 litres. Durant les 1h30 de transport, la température de l'eau est régulièrement contrôlée et stabilisée par un ajout de glace pilée. De plus, la teneur en oxygène est maintenue par insufflation d'air. A la suite de chaque période d'essais, les poissons sont reconduits au Tannenbach avec les mêmes précautions. L'opération

a été répétée à 6 reprises dans le cadre de cette recherche (Tableau 3.3). Afin de constituer distinctement 2 groupes, la nageoire adipeuse est coupée sur le dos de la moitié de l'effectif pêché. Cette méthode de reconnaissance s'est imposée à la suite de tests de marquage sous forme d'une tache de colorant injectée sous la peau du dos du poisson, insatisfaisante en terme de visibilité. Concernant la justification de l'acte de sectionnement de la nageoire adipeuse, il s'avère que l'absence de cet organe ne porte pas atteinte au comportement du poisson (voir chapitre 2.4.7).



Figure 3.10: a) Vue du Tannenbach à Büttisholz, b) Pêche électrique au Tannenbach, c) Mesure de la longueur des poissons, d) Capture de macro invertébrés dans la Gérine, à Marly.

Date de pêche	27.05.08	08.09.08	14.10.08	15.05.09	22.06.09	05.10.09
Nombre de poissons pêchés	42	21	22	33	20	20
Nombre de poissons échappés	1) 21	0	0	0	0	0
Nombre de poissons morts	2) 13	0	0	7	4) 20	0
Nombre de poissons restitués	3) 8	21	22	26	0	20
Date de restitution		19.09.08	11.11.08	05.06.09		30.10.09

Tableau 3.3: Inventaire des poissons. 1) Lors de la 1^{ère} mise en canal de 21 poissons, les individus se sont échappés vers la Sarine probablement en sautant par-dessus la grille de sortie. 2) Lors de pluies abondantes et continues, une forte et subite turbidité s'est établie durant la nuit dans l'aquarium dans lequel séjournaient les poissons. Au matin, 13 poissons ont été retrouvés morts. 3) Les survivants montrant des signes de dépérissement, ils ont été lâchés dans la Gérine, où l'eau était claire. 4) Un matin, tous les poissons ont été retrouvés morts dans l'aquarium sans qu'aucun dysfonctionnement apparent n'ait été relevé, probablement à la suite d'une rapide et importante élévation de la température de l'eau (observée sur les enregistrements).

3.4.4 Conditions de captivité et programme d'activité

Les truitelles séjournent à la Maigrauge durant 3 semaines, dans 200 litres d'eau contenus dans un aquarium attenant au canal d'essais, et alimenté continuellement en eau courante de la Sarine. Elles sont nourries 3 fois par semaine avec des macro invertébrés prélevés dans le lit de la Gérine (Figure 3.10d), affluent de la Sarine en amont de Fribourg. Cette opération consiste à retourner les pierres constitutives du substrat par de simples mouvements de pied, et à capturer dans un filet, les larves exposées et entraînées par le courant. Elles se trouvent en abondance à la fin du printemps, dans les parties actives du lit où le courant est bien aéré. Elles sont absentes à la suite du lessivage induit par les crues. Pour les maintenir en vie, elles sont acheminées rapidement vers l'aquarium, dans des bouteilles isothermes. Le programme hebdomadaire d'essais est constitué de 3 à 5 phases d'écluesées de 3 heures entrecoupées d'au moins 36 heures de repos (Tableau 3.4). La régularité des essais est dépendante des conditions météorologiques. En principe, chaque poisson a subi 6 séquences d'écluesées ce qui représente un cumul de 18 heures d'essais. La période de captivité a été limitée à 3 semaines car au delà, les poissons montrent des signes d'épuisement caractérisés par la présence de certains individus en situation de perdition contre la grille de sortie du canal.

Lu	Ma	Me	Je	Ve	Sa	Di
Alimentation	Repos	Alimentation	Repos	Alimentation	Repos	Repos
Essais		Essais		Essais		

Tableau 3.4: Programme hebdomadaire des essais.

3.5 Configurations de refuge testées

3.5.1 Configuration de base C0

Les premiers essais ont été entrepris avec la configuration de base C0 (Figure 3.11), soit le refuge à l'état brut, avec ses dimensions de 2.0 mètres x 1.2 mètres, sans cloison interne. Face à la faible attractivité observée (voir chapitre 5.2.5), la création d'un courant d'attrait sortant du refuge a été examinée. Plusieurs variantes techniques ont été esquissées sous diverses formes : jets, by-pass, chasses. Cependant, les moyens artificiels induits par ces solutions les rendent irréalistes. Le grand mérite de cette démarche est d'avoir permis de déboucher sur l'idée de la paroi de dérivation. Cette astuce est destinée à forcer une circulation d'eau dans le refuge qui constitue le courant d'attrait recherché.

3.5.2 Configuration de référence C1

Posée sur le fond, la paroi plane est placée verticalement au centre de la ligne qui marque l'interface entre le refuge et le canal. Elle est disposée de manière perpendiculaire à l'axe du canal principal et couvre toute la hauteur d'eau. D'une longueur au sol de 1.00 m, pour une épaisseur de 3 cm, l'une de ces extrémités dépasse de 0.30 m dans le canal, alors que l'autre extrémité laisse un intervalle vide de 0.50 m jusqu'à la paroi vitrée du refuge.

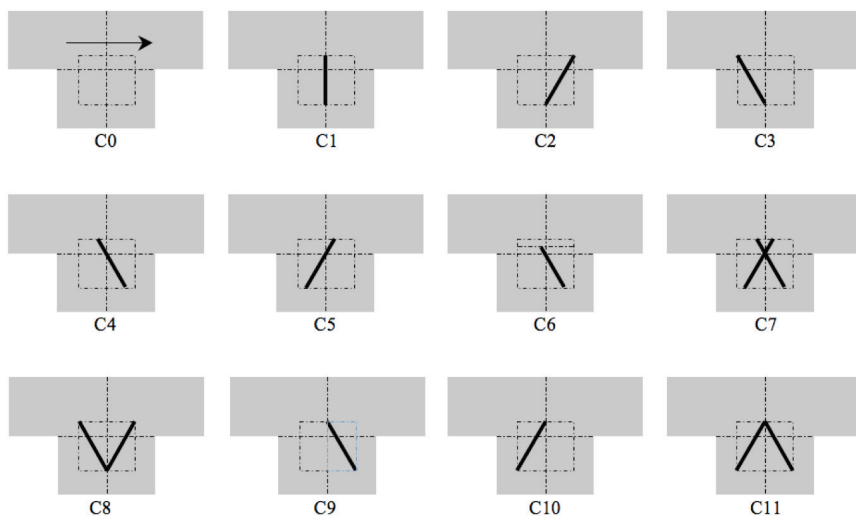


Figure 3.11: Configurations de refuge testées. Le trait gras représente la paroi de dérivation.

3.5.3 Variantes de configurations

L'efficacité de la configuration C1 étant spectaculaire (Figure 5.10), elle a donné lieu à une étude systématique basée sur un ensemble de positions de la paroi, selon un canevas établi. Le positionnement des parois repose sur 3 points fixes disposés sur l'axe de la paroi C1, à savoir, à ses 2 extrémités et à son intersection avec l'interface refuge-canal. Autour de chacun de ces points fixes, 3 positions de parois planes verticales sont testées (Figure 3.12). La première est caractérisée par un angle horizontal d'orientation de 60° par rapport à l'axe du canal. Elle comprend les configurations C3, C4 et C9. La seconde est caractérisée par un angle de 120° . Elle comprend les configurations C2, C5 et C10. La dernière est constituée de la juxtaposition des 2 parois, constituant un triangle équilatéral pour les 2 points fixes placés aux extrémités de C1 et un X pour celui qui est au centre de l'interface. Les configurations en question sont C7, C8 et C11. Elles sont toutes confinées entre les 2 lignes parallèles à l'interface, l'une située à 0.30 m dans le canal, l'autre à la distance de 0.50m de la paroi vitrée du refuge. La configuration C6 fait exception dans la mesure où sa longueur de pénétration dans le canal n'est que de 0.15 m au lieu de 0.30 m (Figure 3.13).

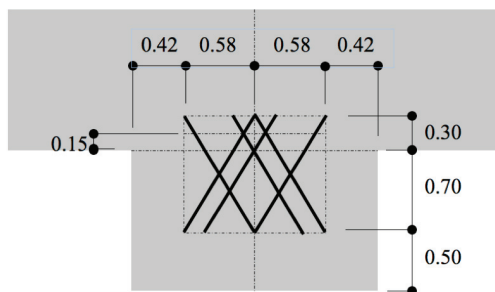


Figure 3.12: Représentation superposée des configurations testées, avec les dimensions du rectangle circonscrit.

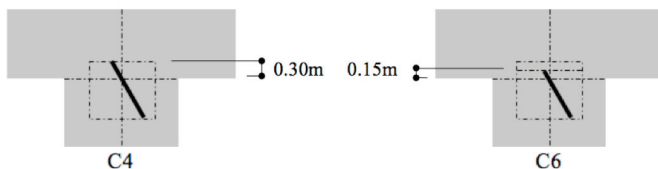


Figure 3.13: Distinction entre les configurations C4 et C6.

3.5.4 Dimensions caractéristiques des configurations

Les différentes configurations ainsi définies, seront par la suite, testées avec les poissons et feront l'objet de mesures de profils de vitesses d'écoulement. Dans ce but, il y a lieu de fixer quelques éléments caractéristiques de leur géométrie. Comme cela sera explicité au chapitre 6.3.3, il est nécessaire de s'appuyer sur des sections particulières. En l'occurrence il sera abondamment fait référence à la section qui marque l'interface entre le canal et le refuge. Par anticipation, les valeurs numériques répondant à la nomenclature de la figure 3.14, sont rassemblées dans le tableau 3.5.

Configuration		C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
Longueur amont 1)	m	-	0.99	1.38	0.60	0.99	0.99	0.99	0.99	0.60	1.17	0.81	0.81
Longueur aval 1)	m	-	0.99	0.60	1.38	0.99	0.99	0.99	0.99	0.60	0.81	1.17	0.81
Angle amont 2)	°	-	90	120	60	60	120	60	120	60	60	120	120
Angle aval 2)	°	-	90	120	60	60	120	60	60	120	60	120	60
Long. pénétr. 3)	m	0.00	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.15	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30

Tableau 3.5: Paramètres géométriques et hydrauliques des configurations, 1) Longueur de la partie de la section interface située en amont/aval de la paroi de dérivation, 2) Angle d'orientation de la face amont/aval, de la paroi de dérivation, 3) Longueur de pénétration de la paroi de dérivation dans la section du canal principal.

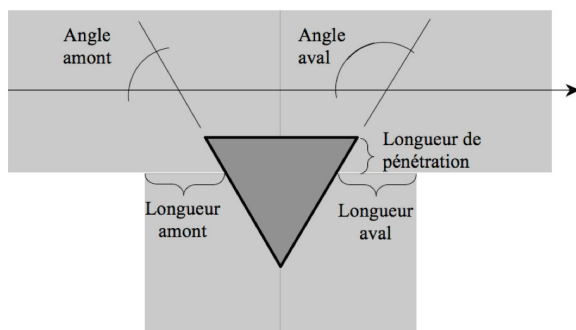


Figure 3.14: Représentation graphique des désignations figurant au tableau 3.4, en superposition du champ de vitesses de la configuration C8.

3.6 Conclusions au sujet de la méthodologie

3.6.1 Procédure expérimentale

Selon ses objectifs, cette recherche nécessite la saisie d'informations sur la réaction des poissons soumis à de fortes vitesses. De ce fait, l'expérimentation avec des poissons est retenue comme méthode de recherche. Dans ce but, un canal écohydraulique est construit dans l'usine hydroélectrique de la Maigrauge à Fribourg (Suisse). Ce site est principalement choisi par le fait qu'il permet d'alimenter le canal avec de l'eau courante de rivière détournée de la Sarine. Les essais avec les poissons (Chapitre 5) sont combinés avec des séquences de mesures de profils de vitesses d'écoulement (Chapitre 6). Préalablement, la connaissance générale des champs de vitesses est produite par simulation numérique (Chapitre 4).

3.6.2 Essais avec les poissons

L'espèce de poissons retenue est la truite fario juvénile. Pour chaque série d'essais, 20 individus sont capturés à l'état sauvage dans les eaux du Tannenbach à Büttisholz (LU). Sur le site de la Maigrauge, ils séjournent dans un aquarium de 200 litres alimenté en continu, en eau de rivière. 3 fois par semaine, ils sont alimentés avec des macroinvertébrés capturés en rivières. Les poissons participent en moyenne à 6 séquences d'essais d'une durée de 3 heures chacune.

3.6.3 Configurations à tester

A partir de la configuration de base C0, 11 configurations de refuge (Figure 3.11) sont retenues pour des essais systématiques avec les poissons dans le canal expérimental. Elles se distinguent par la position et l'orientation d'une paroi verticale placée à l'interface entre le refuge et le canal. Cette paroi impose la dérivation dans le refuge d'une partie du débit qui s'écoule dans le canal principal. L'écoulement la contourne puis le débit est restitué au canal à la sortie du refuge. Cette restitution constitue le courant d'attrait pour le poisson. L'objectif principal des essais est de maximiser le taux de présence de poissons dans le refuge en situation d'éclusées dans le canal principal.

4 SIMULATIONS NUMÉRIQUES

4.1 Objectifs et étendue de la modélisation numérique

La simulation numérique s'est imposée comme moyen d'accompagnement de la démarche expérimentale. Initialement elle a permis de concevoir le canal d'essais. Puis, elle a servi à l'appréciation comparative des configurations préalablement aux essais. En effet, les mesures hydrauliques intervenant après les essais avec les poissons, il était précieux de disposer d'informations hydrauliques préliminaires. Subsidiairement, il est intéressant de comparer les profils de vitesses simulées et mesurées dans quelques sections de contrôle, dans un objectif de validation de la modélisation numérique. Finalement, elle a servi au calcul des débits échangés entre le canal et le refuge.

Concernant l'étendue d'application de la simulation numérique, plusieurs questions se posent. Tout d'abord intervient le choix de l'outil de simulation, lui-même dépendant de l'espace dimensionnel à considérer, 2D ou 3D. Vient ensuite la pertinence des résultats en regard de la compréhension du comportement des poissons. Autrement dit, pourrait-on se contenter des simulations numériques et se passer des mesures de vitesses in situ, du moins de manière systématique ? Ces questions sont abordées dans la suite de ce chapitre.

4.2 Modélisation 3D avec SSIIM

4.2.1 Présentation générale

SSIIM est l'abréviation du nom complet "Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option". Ce programme a été conçu au début des années '90 par le Professeur Nils Olsen et son équipe, à l'Université des Sciences et Technologies de Trondheim en Norvège, (Olsen, 2006). Il est destiné à l'enseignement et la recherche dans le domaine de l'hydraulique fluviale et environnementale. Sa force réside dans la simulation du transport de sédiments fins, sur des lits mobiles à géométrie complexe. Du fait de sa constitution, son domaine d'application s'est étendu à la simulation des écoulements 3D en rivière. Actuellement il est aussi utilisé pour la modélisation des habitats à poissons (Harby & al, 2002).

SSIIM résout les équations de Navier-Stokes, avec le modèle de turbulence $k-\epsilon$ pour le calcul des contraintes de cisaillement. L'algorithme standard reproduit le comportement d'un milieu incompressible. Il ne tient pas compte du terme de gravité. Le schéma de résolution est de type implicite. Les équations sont discrétisées par la méthode des volumes finis. La grille de

type multi-blocks non-orthogonale est constituée de cellules quadrilatères. La particularité probablement la plus contraignante du programme pour la simulation des écoulements à surface libre, est le recours à la méthode SIMPLE (Semi-Implicite Method for Pressure Linked Equations), décrite par Patankar (1980). D'un point de vue descriptif, l'idée de cette méthode est de reproduire la surface libre à partir d'un plan horizontal de référence de pressions juste immergé, auquel est apportée une correction représentative de la hauteur d'eau locale qui surmonte ce plan. Cette astuce permet de traiter un écoulement à surface libre comme un écoulement sous pression (Figure 4.1). Si l'intérêt est porté à la surface libre, les informations sont alors insuffisantes, surtout si des changements de régime sont prévisibles. Dans le cas présent, l'usage de la modélisation 3D était destiné, d'une part à se convaincre que les composantes verticales de vitesses sont insignifiantes sauf à l'endroit des points d'arrêt d'autre part à se prononcer sur la largeur minimale requise du canal. Pour fournir cet éclairage initial, les particularités de la méthode SIMPLE ne semblaient pas compromettantes.

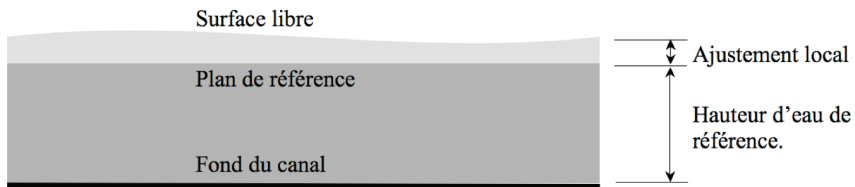


Figure 4.1: Illustration de la prise en compte de la hauteur d'eau dans la méthode SIMPLE.

4.2.2 Largeur minimale du canal

Comme cela est développé au chapitre 3, la largeur du canal résulte d'une optimisation entre les conditions d'écoulement du débit disponible et l'espace nécessaire aux poissons. La valeur de 1.2m résulte également d'une analyse de la distribution transversale des vitesses, effectuée avec SSIIM 3D. La démarche consistait à simuler les conditions hydrauliques pour des largeurs de canal successivement réduites de 5 à 1m, par pas de 1m. Le débit unitaire était fixé à 200 l/s*m de largeur et la hauteur d'eau était maintenue à 0.24m en aval du refuge. Comme au moment de la construction du canal l'idée de la dérivation d'eau forcée vers le refuge n'était encore pas apparue, ces tests ont été accomplis sur la base de la configuration C0. Dans ce cas, l'examen visuel des champs de vitesses, a permis de constater que mis à part au voisinage de la paroi gauche, la distribution horizontale des vitesses dans le canal n'était pas significativement influencée par sa largeur, dès que celle-ci dépasse 1m. Cette appréciation s'est ajoutée aux critères rappelés ci-dessus, pour fixer la largeur du canal à 1.2m. Il est ainsi possible d'admettre que le canal de la Maigrauge représente la berge et son voisinage d'une rivière plus large, autant d'un point de vue hydraulique que sous l'angle du comportement des poissons qui, en cas de danger, se retranchent vers les berges. L'installation d'une paroi de

dérivation d'eau vers le refuge, n'est intervenue qu'une fois le canal construit. Par conséquent, les 30 cm de pénétration de la paroi dans l'écoulement du canal constituent le maximum au delà duquel la représentativité du canal pour une rivière de plus grande largeur serait compromise (Figure 4.2).

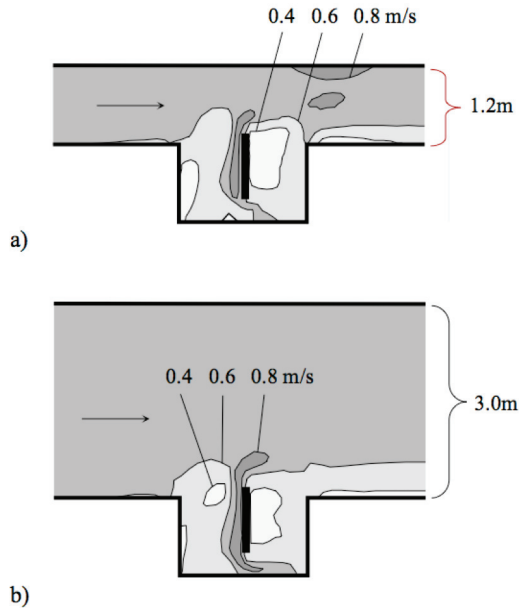


Figure 4.2: Exemples de lignes d'égales vitesses simulées avec SSIIM-3D, niveau à 2.5cm du fond, configuration C1 avec 2 largeurs du canal, a) largeur de 1.2m, b) largeur de 3.0m

4.2.3 Importance des composantes verticales de vitesse

En cas d'écluse, la hauteur d'eau dans le canal est 4 à 5 fois plus petite que les dimensions transversales les plus courtes, telle la largeur du canal. Cette proportion pourrait suffire à admettre que l'écoulement est bidimensionnel (Graf & al, 1993). Toutefois, en considérant les effets de chocs produits par la paroi de dérivation, il a semblé judicieux d'examiner l'intensité des composantes verticales de vitesses, avant d'adopter le référentiel 2D. Les calculs ont confirmé qu'elles étaient quasiment nulles. Sur la base de ce constat, il a été décidé de renoncer à SSIIM et de poursuivre les simulations avec BASEMENT 2D.

4.3 Modélisation 2D avec BASEMENT

4.3.1 Présentation générale

L'un des intérêts prévalant au choix du logiciel BASEMENT repose sur l'opportunité de collaboration avec ses concepteurs, dans le cadre du programme de recherche Rivermanagement (Schleiss & al, 2008). BASEMENT est l'acronyme de BASic EnvironMENT for simulation of natural flow and hazard simulation. Le logiciel est développé par le Laboratoire d'Hydraulique, d'Hydrologie et de Glaciologie (VAW) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich (Faeh & al, 2008). Durant la période d'utilisation il contenait les options 1D dénommée BASEchain et 2D dénommée BASEplane. Depuis lors, il a été complété par l'option 3D qui porte le nom de BASEspace, ainsi que par un module de calcul du transport solide (Figure 4.3, Faeh & al, 2010). Les simulations 2D décrites ci-après ont été effectuées avec la version 1.4 de BASEplane.

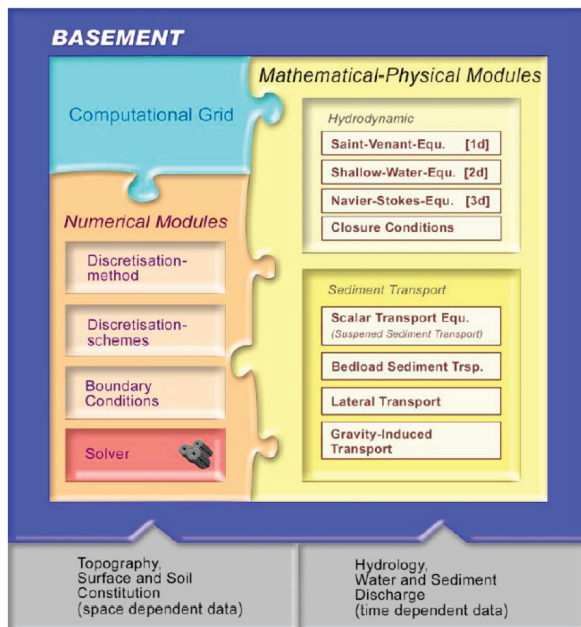


Figure 4.3: Composition du système de modélisation BASEMENT, figure tirée du manuel d'utilisation (Faeh & al, 2010).

Du point de vue hydrodynamique, le module BASEplane traite les écoulements à surface libre en eau peu profonde, permanents et non-permanents, en résolvant les équations de Navier-Stokes simplifiées. Cela sous-entend que la distribution des pressions sur la verticale est hydrostatique et que les composantes verticales de vitesses sont d'un ordre subsidiaire en comparaison des composantes horizontales. La méthode des volumes finis est appliquée et le choix du schéma de résolution est assujéti à la stabilité des calculs, partant du schéma explicite simple, rapide mais sensible, vers le schéma implicite plus lourd mais plus stable. Les informations détaillées concernant BASEplane figurent dans le manuel d'utilisation et le document de référence de BASEMENT (Faeh & al, 2008). Du point de vue informatique, Basement résout des algorithmes numériques regroupés dans des modules. Il faut l'alimenter en données sous forme d'un réseau de mailles et récupérer les résultats des simulations qu'il produit pour les visualiser et les exploiter. Il doit donc être associé à des algorithmes de pré- et de post-traitement (Fig. 4.4). En l'occurrence c'est le logiciel SMS, abréviation de Surface water Modeling System, version 9.2 qui est utilisé.

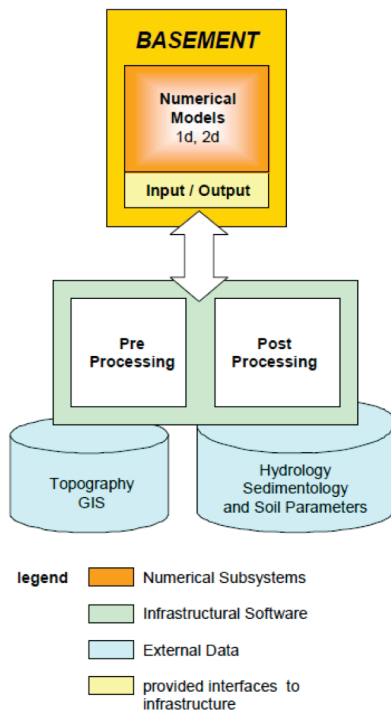


Figure 4.4: Procédure d'utilisation de BASEMENT, figure tirée du manuel d'utilisation (Faeh & al, 2010).

4.3.2 Prétraitement

Le maillage est généré en étapes successives. Tout d'abord le plan du canal est construit avec ses lignes principales et ses points fixes (Figure 4.5a). Puis le maillage est généré sous forme de polygones. Pour la stabilité et la précision du calcul, il est préférable de travailler avec des mailles triangulaires, alors que le recours à des rectangles permet d'écourter le temps de calcul, sinon très long. Par compromis, des mailles rectangulaires sont choisies pour modéliser le canal et des mailles triangulaires sont utilisées pour le refuge et ses alentours (Figure 4.5b). Une fois le réseau constitué, chaque nœud est repéré en coordonnées et en altitude, x-y-z, et une valeur de la rugosité est attribuée à chaque cellule. Le fichier de données ainsi constitué est prêt à être appelé par BASEMENT. En parallèle, les données hydrauliques telles que les conditions limites, d'entrée et de sortie du canal sont rassemblées dans un autre fichier. En l'occurrence, ce sont celles qui sont mentionnées au chapitre 3.2.6. Le débit d'éclusee de 220 l/s est imposé à l'entrée du canal et réparti uniformément sur sa largeur. La rugosité est fixée à $K_s = 56 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, La hauteur d'eau de 0.24m, imposée à la sortie du canal par la grille, est établie en profondeur normale tout au long du canal, par le réglage de la pente à 0.44%.

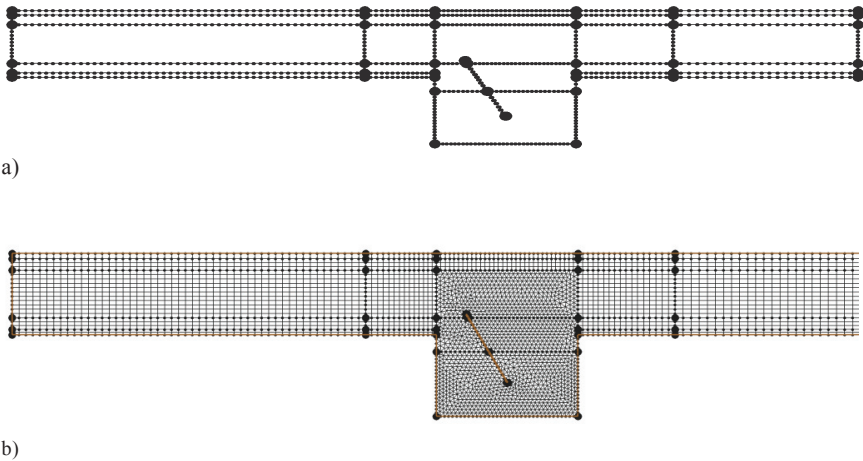


Figure 4.5: Configuration C3, génération du maillage dans SMS, a) Lignes principales, b) Trame fine, à mailles rectangulaires dans le canal et triangulaires dans la zone du refuge.

4.3.3 Post-traitement

BASEMENT produit différents fichiers contenant des informations sur les vitesses, les profondeurs d'eau, les niveaux d'eau et les contraintes de cisaillement. Ces fichiers sont ensuite introduits et traités dans SMS. Différentes possibilités d'exploitation sont offertes, comme par exemple les champs de hauteurs d'eau et de vitesses présentés en figure 4.6.

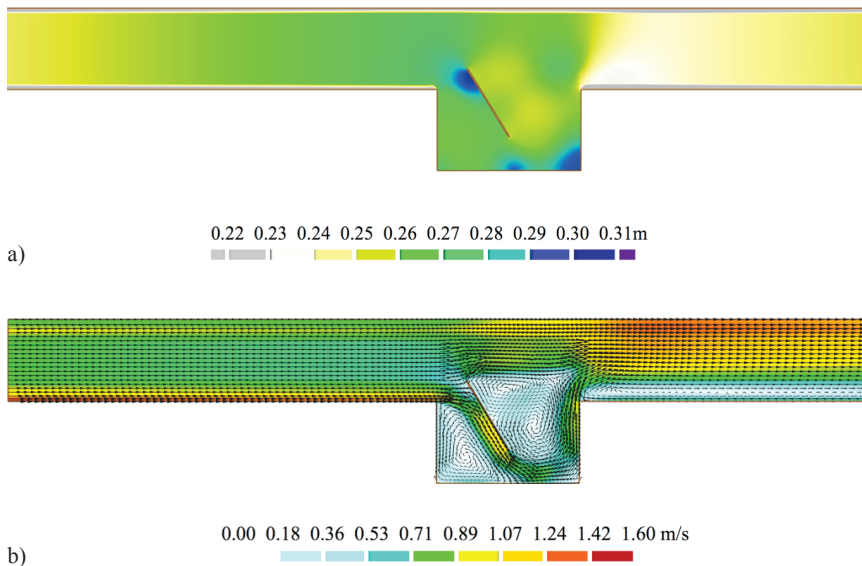


Figure 4.6: Configuration C3, exemples de champs de paramètres issus du post-traitement SMS : a) profondeurs d'eau, b) vitesses d'écoulement. L'échelle géométrique est donnée par la longueur totale de chaque image qui correspond aux 12m du canal expérimental.

Les nuances de couleurs sont à l'échelle des grandeurs des paramètres. Sur la figure 4.6a, les points d'arrêt de l'écoulement sont visibles par les taches de couleur bleu-violet qui montrent une élévation locale de la hauteur d'eau. Sur la figure 4.6b, les mêmes endroits sont marqués par des vitesses qui s'annulent localement. Sur cette même figure l'information est enrichie par la représentation vectorielle des vitesses. Par ce moyen, la direction de l'écoulement est visible. Ainsi des cellules de rotations à faible vitesse sont apparentes de part et d'autre de la paroi de dérivation. L'un des produits de ce traitement, est représenté par les champs de vitesses relatifs à chaque configuration testée (Figures 4.8 à 4.9 et 4.11 à 4.14). Le travail de modélisation avec BASEMENT a été effectué en collaboration avec Kathrina Steffen (Steffen, 2009).

4.4 Analyse des résultats de simulations Basement 2D

4.4.1 Analyse visuelle des champs de vitesses

A l'exception de la configuration C0, le champ de vitesses de chaque configuration est caractérisé par les mêmes éléments constitutifs, qui se distinguent par leur emprise (Figure 4.7). Une partie du courant principal heurte la paroi de dérivation occasionnant la formation d'un point d'arrêt. Cet endroit marque l'entrée d'un couloir d'écoulement du courant dérivé. Celui-ci longe tout d'abord la paroi de dérivation puis il change de direction, retournement de 180° dans le cas de la configuration C1, pour se concentrer sur la paroi aval du refuge. Il rejoint l'écoulement principal du canal en opérant à nouveau un changement de direction de 90° . Ce couloir de circulation entraîne 2 cellules de rotation ainsi qu'une zone de décollement à la sortie.

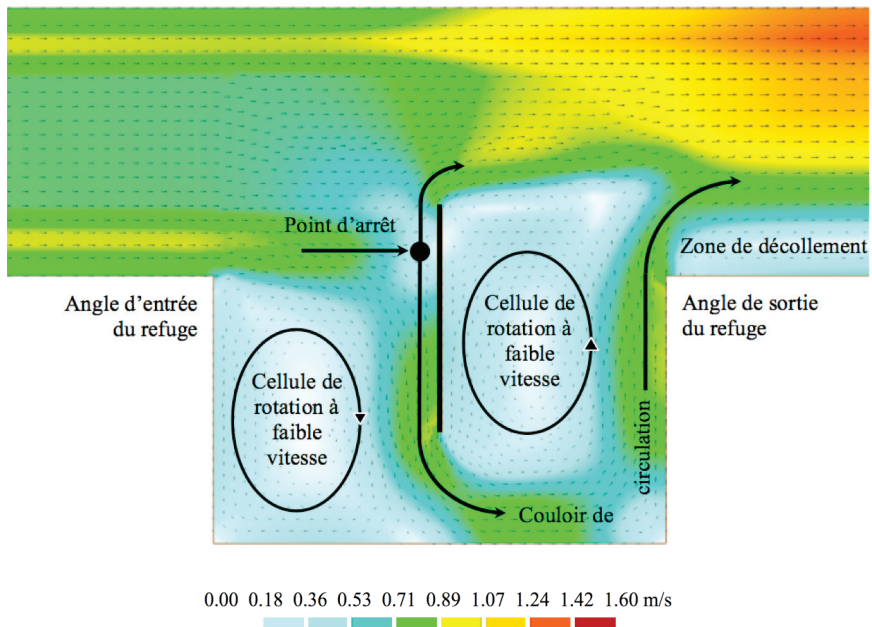


Figure 4.7: Eléments constitutifs d'un champ de vitesses d'écoulement au voisinage et à l'intérieur du refuge, exemple de la configuration C1.

Les champs de vitesses ont prioritairement été visualisés pour la sélection des configurations. Une diversité maximale des flux de circulation dans le refuge était avant tout recherchée. La systématique de positionnement et d'orientation de la paroi de dérivation a été établie sur

cette base (Figures 4.8 et 4.9). Partant de la configuration C1, considérée comme référence, il est intéressant de se concentrer sur la taille et la forme des 2 cellules de rotation situées de part et d'autre de la paroi de dérivation (Figure 4.7).

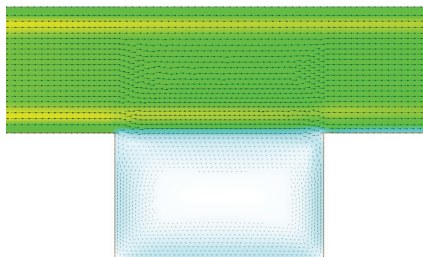
Par comparaison des configurations, l'influence de l'orientation de la paroi sur l'entrée de l'eau dans le refuge est perceptible. En effet, les images des configurations C3, C4, C8 et C9 (Figures 4.8 et 4.9) montrent un couloir de circulation bien établi et continu. Elles ont en commun l'angle amont d'orientation de la paroi de dérivation, qui est de 60° . Les configurations C2, C5, C7, C10 et C11 dont l'angle amont vaut 120° , sont caractérisées par la formation d'un point d'arrêt bien marqué, sur la face amont de la paroi de dérivation, dans le prolongement de la paroi droite du canal principal.

D'autre part, on peut aussi observer l'influence de la position de la paroi en comparant les champs de vitesses de 2 configurations dont l'angle d'orientation de la paroi de dérivation est identique. Par exemple, pour les configurations C3 et C9 cet angle vaut 60° . Par contre la longueur de la ligne interface située en amont de la paroi de dérivation vaut 0.6m pour C3 et 1.17m pour C9 (Tableau 3.5). La conséquence visible de cette différence dans l'éloignement de la paroi par rapport à l'angle d'entrée du refuge, est marquée par la largeur du couloir d'écoulement qui est nettement plus étroit sur le champ de la configuration C9.

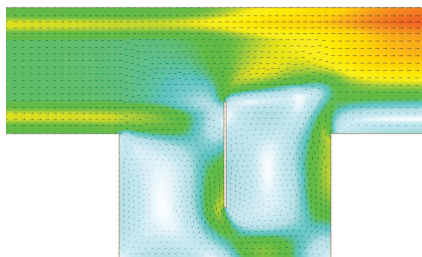
A la suite de l'étude de configurations qui comprennent une seule paroi, sont apparues les configurations qui combinent 2 parois (Figure 3.11). Ainsi, la configuration C7 est la superposition de C4 et C5, la configuration C8 est la combinaison de C2 avec C3, et la configuration C11 associe de C9 avec C10. Comme de petites îles, ces configurations combinées offrent des possibilités d'intégration intéressantes tant du point de vue constructif que paysager et écologique.

Enfin, des tests ont été effectués sur la longueur de pénétration de la paroi dans l'écoulement principal (Figure 3.11). Si cette longueur est de 0.30m pour toutes les configurations, elle est réduite à 0.15m pour la configuration C6 (Figure 3.13). Pour le reste sa géométrie est en tous points semblable à celle de la configuration C4. Le champ de vitesses de la configuration C6 apparaît comme nettement moins animé dans le refuge, en comparaison avec celui de la configuration C4 caractérisé par une bonne dynamique d'écoulement dans le refuge. C'est à la suite de ce constat que fut fixé la longueur de pénétration à la valeur de 0.30m pour toutes les autres configurations.

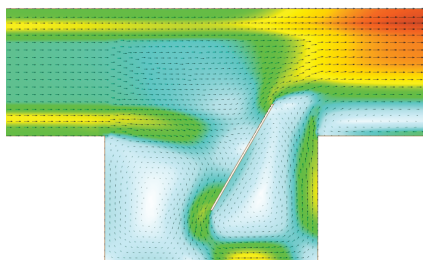
C0



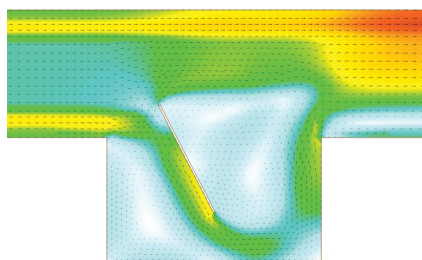
C1



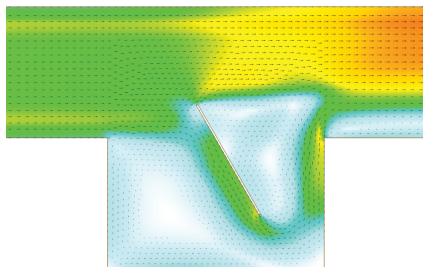
C2



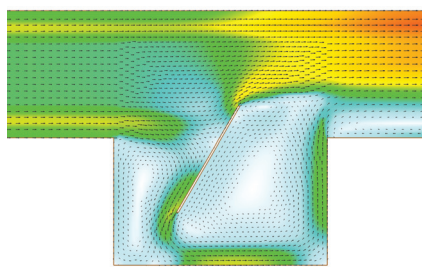
C3



C4



C5

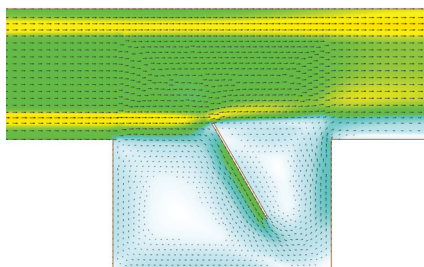


0.00 0.18 0.36 0.53 0.71 0.89 1.07 1.24 1.42 1.60 m/s

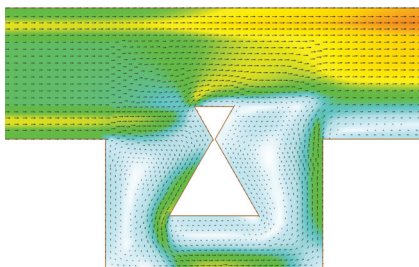


Figure 4.8: Champs de vitesses d'écoulement simulés avec BASEMENT 2D, configurations C0 à C5. L'écoulement va de gauche à droite. La vitesse moyenne est de 0.79 m/s dans le canal.

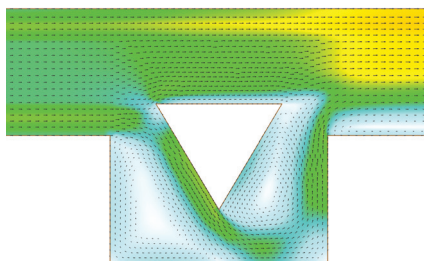
C6



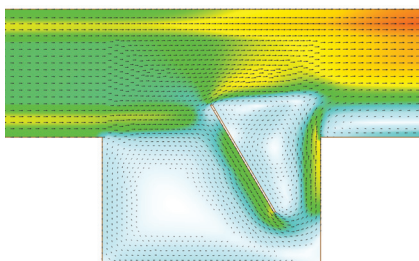
C7



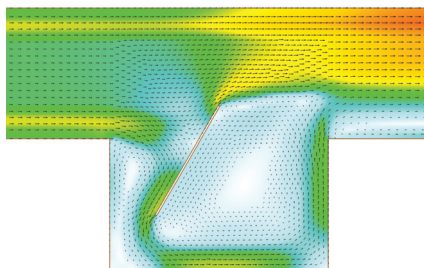
C8



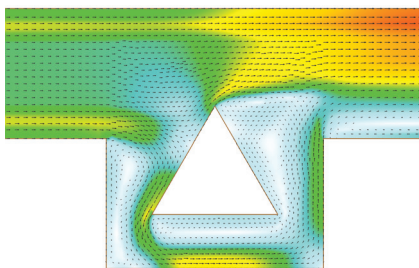
C9



C10



C11



0.00 0.18 0.36 0.53 0.71 0.89 1.07 1.24 1.42 1.60 m/s



Figure 4.9: Champs de vitesses d'écoulement simulés avec BASEMENT 2D, Configurations C7-C11. L'écoulement va de gauche à droite. La vitesse moyenne est de 0.8 m/s dans le canal.

4.4.2 Analyse de la distribution des vitesses le long de la ligne interface

Pour étayer l'analyse visuelle il a paru nécessaire de s'intéresser à l'intensité et la distribution des vitesses dans une section de contrôle, ce paramètre étant celui auquel les poissons sont confrontés lors de leurs déplacements. S'agissant par la suite de quantifier les débits qui transitent par le refuge, le plan vertical d'interface entre le refuge et le canal a été considéré comme section de contrôle. Dans l'hypothèse d'un écoulement 2D, cette section est matérialisée par une droite qui s'inscrit dans le prolongement de la paroi droite du canal principal, appelée « ligne interface » par la suite. SMS permet d'extraire les vitesses ou profondeurs d'eau le long d'une ligne choisie. En application de cette procédure, le profil de vitesses le long de la ligne interface, a été établi pour l'ensemble des configurations. Connaissant l'intensité et la direction des vecteurs-vitesses, les composantes longitudinales, c'est à dire orientées selon l'axe du canal, et transversales peuvent être différenciées. Seules les composantes transversales c'est à dire normales à la ligne interface ont été considérées car elles sont révélatrices des échanges d'eau entre le canal et le refuge. La désignation des éléments caractéristiques est présentée sur le profil de vitesses de la configuration C1 (Figure 4.10).

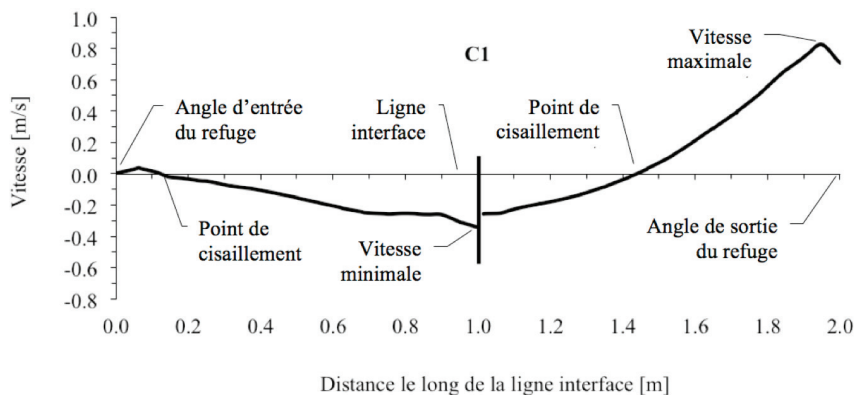


Figure 4.10: Distribution des composantes normales de vitesses le long de la ligne interface, issue de la simulation BASEMENT 2D de la configuration C1. En abscisse figure la distance le long de la ligne interface [m], comptée depuis l'angle d'entrée du refuge.

La règle des signes choisie est telle que les vitesses dirigées du refuge vers le canal sont positives et celles qui se dirigent vers le refuge sont négatives. De ce fait la vitesse minimale est la plus grande valeur négative. La vitesse maximale est la plus grande valeur positive. Les points de changement de signe de la valeur de la vitesse sont appelés les points de cisaillement.

Les profils de vitesses normales le long de la ligne interface sont présentés sur les figures 4.11 à 4.14, pour chaque configuration simulée avec BASEMENT 2D. La position de la paroi de dérivation est bien visible par l'interruption de la ligne de chaque profil. Les parties gauche et droite, représentent respectivement l'entrée et la sortie du flux dérivé dans le refuge. Sur chaque partie de profil, l'influence de l'angle d'orientation de la paroi est perceptible. Pour mémoire, la référence de l'angle d'orientation est donnée par la figure 3.14. Concernant la partie gauche, soit celle qui est en amont de la paroi de dérivation, l'orientation de la paroi à 60° produit un profil nettement entrant dans le refuge, alors qu'avec un angle de 120° , le profil subit un retour vers le canal à l'approche de la paroi de dérivation. En aval de la paroi de dérivation, un effet similaire est observé au dos de la paroi de dérivation. Avec un angle d'orientation de 60° , un courant de retour est nettement apparent le long de ladite paroi, alors que le profil tend vers la formation d'un 2^{ème} point de cisaillement à l'approche de cette même paroi. Ces observations sont vérifiées pour tous les profils.

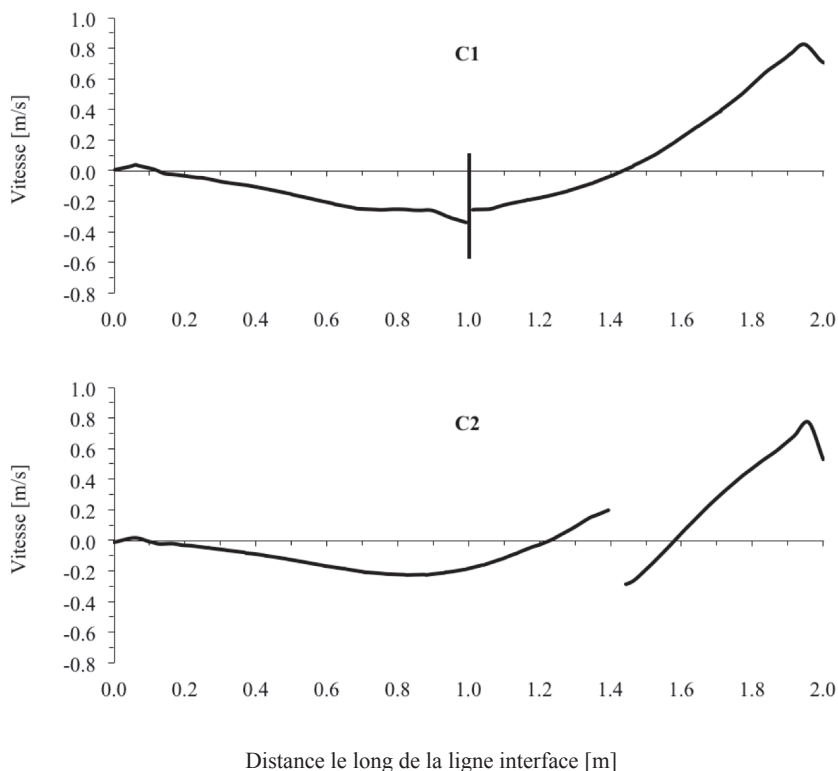


Figure 4.11: Profils de composantes normales de vitesses d'écoulement le long de la ligne interface, simulations BASEMENT 2D, configurations C1 et C2.

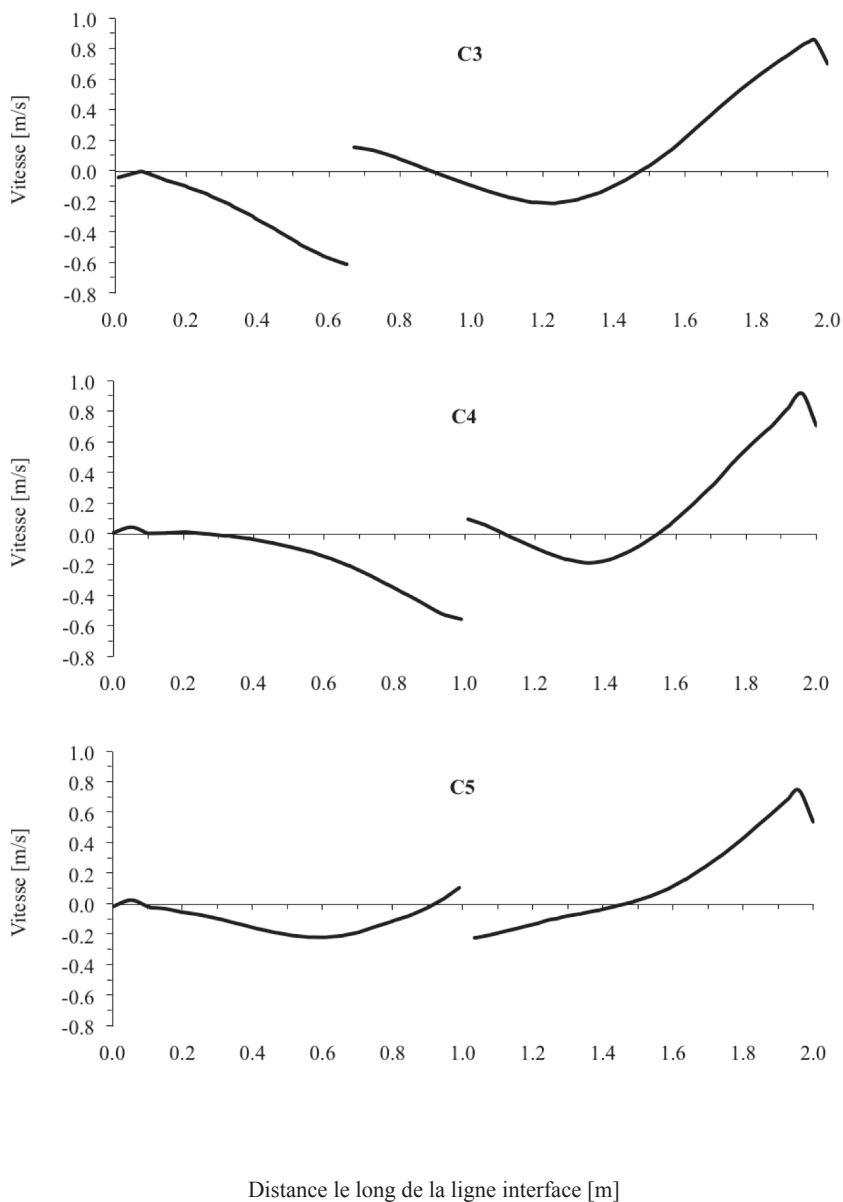


Figure 4.12: Profils des composantes normales de vitesses d'écoulement le long de la ligne interface, simulations BASEMENT 2D, configurations C3 à C5.

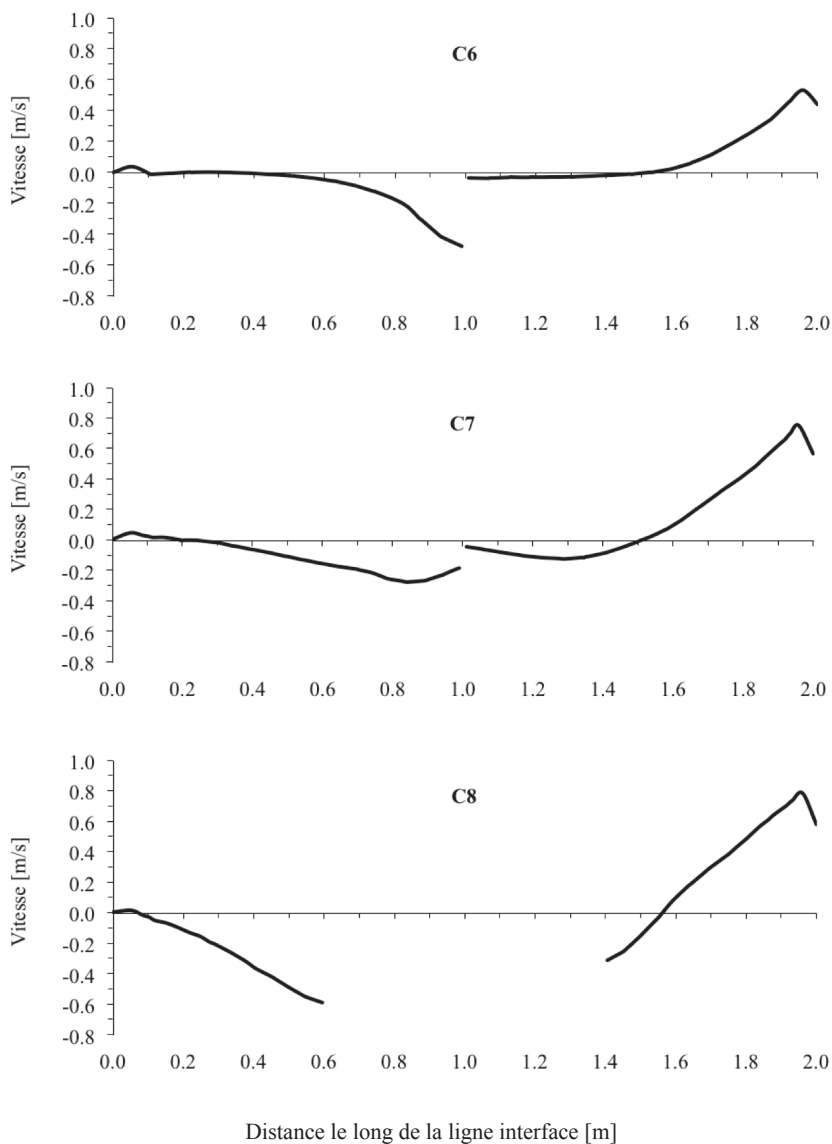


Figure 4.13: Profils des composantes normales de vitesses d'écoulement le long de la ligne interface, simulations BASEMENT 2D, configurations C6 à C8.

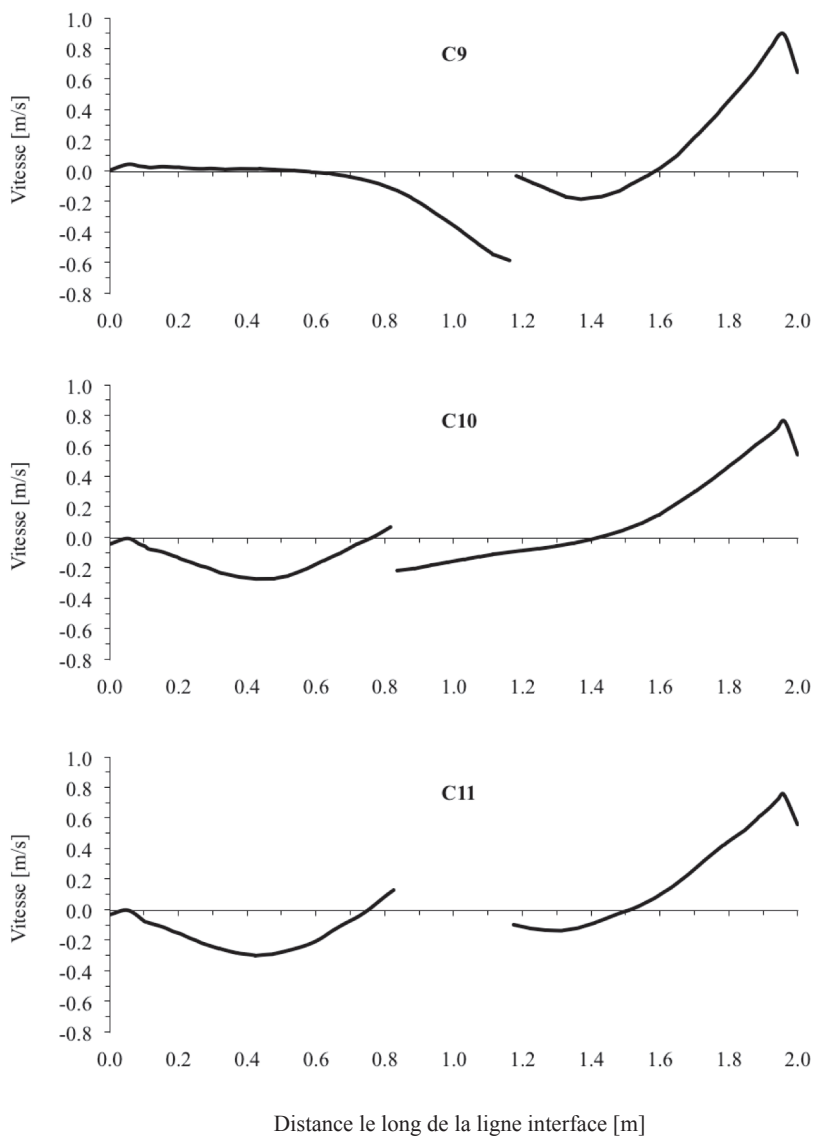


Figure 4.14: Profils de vitesses d'écoulement le long de la ligne interface, simulations BASEMENT 2D, configurations C9 à C11.

Les vitesses caractéristiques des profils sont représentées sur la figure 4.15. Les valeurs maximales, minimales et moyennes de chacune des configurations étudiées sont indiquées. La vitesse maximale est atteinte à la sortie du refuge, en aval de la paroi de dérivation, alors que la vitesse minimale correspond au flux entrant dans le refuge, en amont de la paroi de dérivation. Comme les données sont produites à intervalle régulier le long de la ligne interface, la moyenne arithmétique des vitesses le long de cette ligne devrait être nulle, dès lors que le débit entrant dans le refuge est égal à celui qui en ressort. Pour en juger et à titre de validation, cette moyenne apparaît également sur la figure 4.15. Les bâtonnets sont effectivement très proches de l'origine, avec une moyenne de 0.01 m/s.

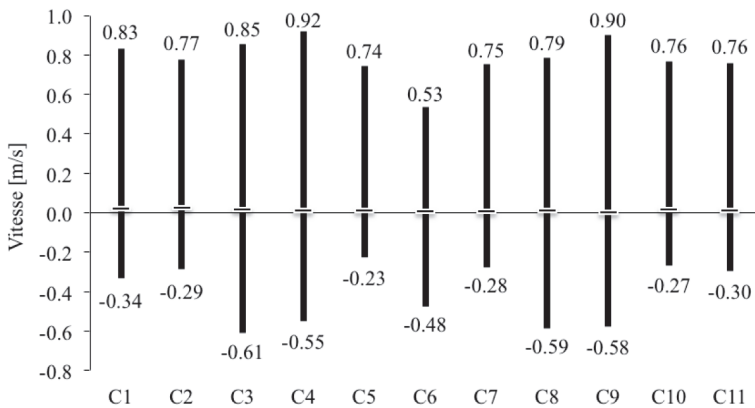


Figure 4.15: Valeurs maximale, moyenne et minimale de la vitesse le long de la ligne interface, extraites des profils simulés avec BASEMENT 2D, pour chaque configuration. Le bâtonnet proche de l'axe horizontal représente la vitesse moyenne tout au long de la ligne interface

Les vitesses maximales varient entre 0.53 et 0.92 m/s, soit respectivement 67 à 116% de la vitesse moyenne dans le canal principal (tableau 3.2). Par la suite le rapport à cette vitesse de référence est mentionné entre parenthèses. La moyenne des vitesses maximales est de 0.78 m/s (100%), pour un écart type de 0.15 m/s. De même les vitesses minimales, s'étendent entre -0.61 (48%) et -0.23 m/s (29%), avec une moyenne de -0.41 m/s (52%) et un écart-type de 0.10 m/s. Les configurations étudiées offrent donc une grande dispersion de valeurs extrêmes des vitesses. En ce sens, la diversité recherchée est bien obtenue.

En réalité, chacune des 2 parties constitutives du profil de vitesses comporte ses propres valeurs maximale et minimales. Le passage de l'une à l'autre est révélateur de l'existence d'un point de cisaillement, envers lequel une attention particulière est portée. En effet, ce point peut correspondre à un signal perceptible, voire recherché par le poisson dans son

cheminement. Les vitesses maximales et minimales de chaque partie sont représentées en valeurs relatives sur les figures 4.16 a et b. On entend par valeur relative, la valeur effective rapportée à la vitesse moyenne dans le canal principal qui est de 0.79 m/s (Tableau 3.2).

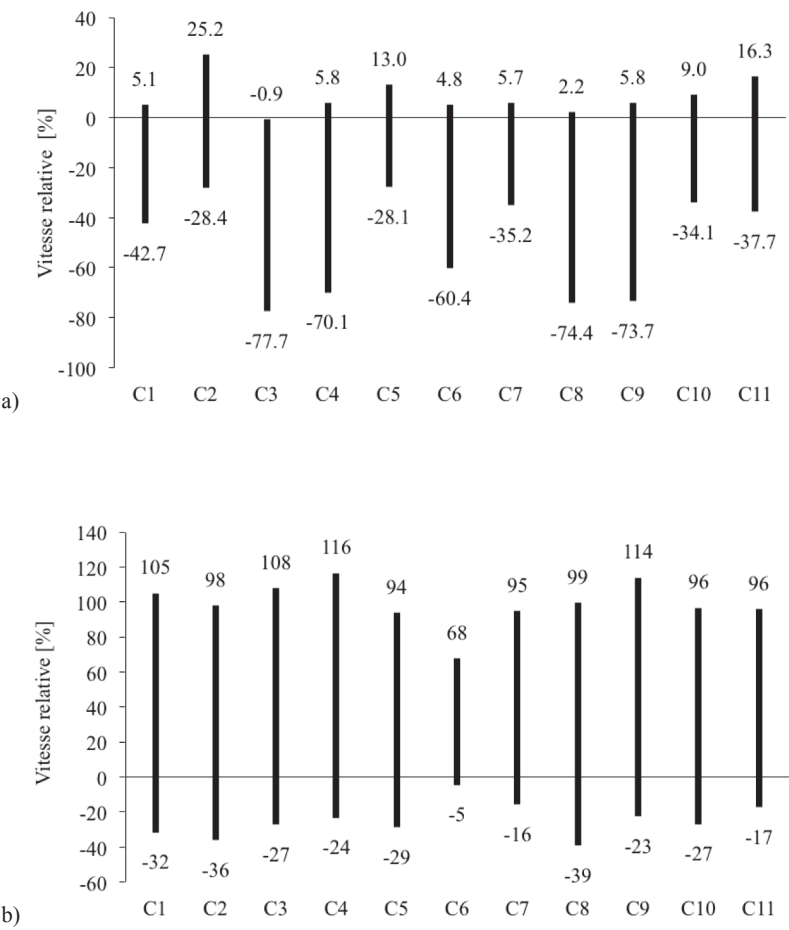


Figure 4.16: Vitesses relatives extrêmes a) dans la partie de la ligne interface située en amont de la paroi de dérivation, b) dans la partie en aval. Les valeurs sont relativisées par rapport à la vitesse moyenne dans le canal principal qui vaut 0.79 m/s.

4.5 Validation des résultats BASEMENT 2D

4.5.1 Mesures de vitesses au micromoulinet dans la section interface

A titre de vérification des résultats issus des simulations BASEMENT 2D, les vitesses ont été mesurées au micromoulinet, en 110 points dans la section interface (Figure 4.17), soit sur 22 profils et 5 niveaux. Les profils sont équidistants de 0.10m sauf aux extrémités et au centre où des profils supplémentaires sont relevés à 0.04m des parois respectives. Quant à la répartition des mesures sur la hauteur d'eau, les points sont successivement pris à 0.02m, 0.07m, 0.12m et 0.17m du fond. La procédure de mesure débute par la définition de l'orientation du vecteur-vitesse. Cette information est saisie par l'immersion d'une girouette verticale qui indique la direction horizontale du courant (Figure 4.18a). Elle est supportée par une tige verticale au sommet de laquelle une aiguille horizontale montre son orientation sur un rapporteur à 360°.

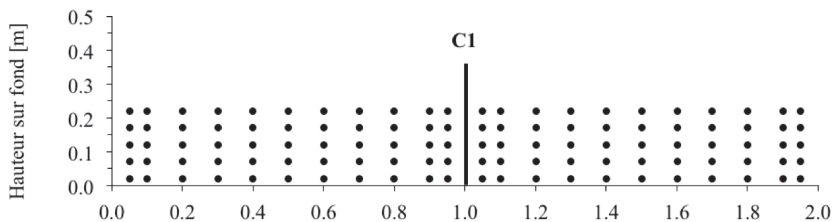


Figure 4.17: Distribution des vitesses d'écoulement dans la section interface. Densité de points de mesures au micromoulinet. Exemple de la configuration C1.

La vitesse ponctuelle est mesurée avec un micromoulinet de précision ± 1 mm/s (Figure 4.18b), orienté selon l'angle mesuré précédemment. Dans les zones à fortes fluctuations, il est difficile de définir une direction stable. Dans ces cas, les valeurs minimales et maximales de l'angle sont enregistrées. La mesure de vitesse se fait selon 3 directions à savoir ces 2 valeurs d'angle et leur médiane. La moyenne des 3 vitesses mesurées est considérée comme indicative. Ces zones à fortes fluctuations sont confinées à l'extérieur du couloir de circulation, principalement dans les zones d'accalmie. Autrement dit, la précision des résultats est certainement proportionnelle à l'intensité de la valeur mesurée, maximale dans le couloir de circulation, et réduite dans les cellules de rotation (Figure 4.7).

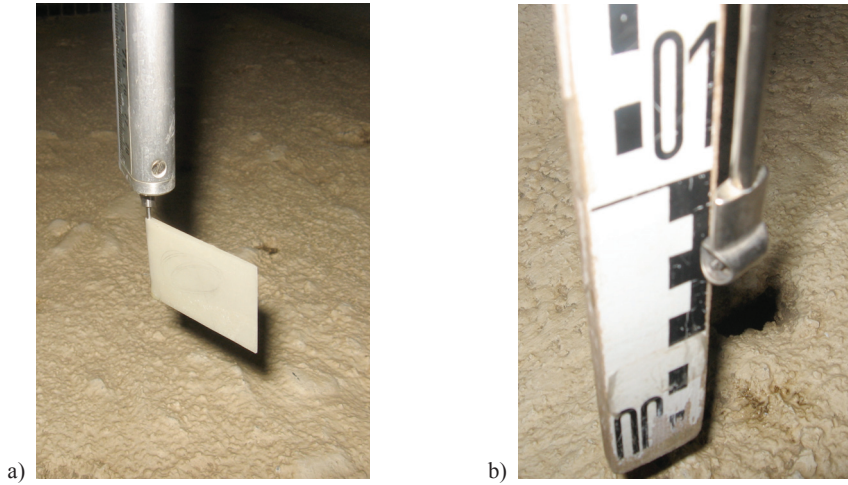


Figure 4.18: *Micromoulinet hydrométrique Schilknecht, a) girouette indicatrice de la direction horizontale de la vitesse, b) hélice intégrée dans le cylindre profilé.*

La composante normale de la vitesse mesurée est extraite en chaque point. Puis, la moyenne des 5 valeurs sur chaque profil vertical est calculée par intégration selon la méthode des trapèzes. Par rassemblement des 22 valeurs moyennes ainsi obtenues, un profil horizontal 2D comparable à celui produit par simulation numérique 2D est constitué.

4.5.2 Comparaison des résultats du micromoulinet avec ceux de BASEMENT 2D

Les opérations décrites au chapitre 4.5.1 pour la mesure des vitesses au micromoulinet, ont été effectuées pour les configurations C1 et C4. En plus des mesures de vitesses, les hauteurs d'eau ont été relevées au droit de chaque profil vertical, à l'aide d'une pointe limnimétrique de précision $\pm 0.1\text{mm}$. La comparaison des valeurs simulées et mesurées porte sur ces 2 paramètres.

Concernant les vitesses, les courbes sont semblables par leur allure (Figure 4.19a et b). Si elles concordent bien sur la forme générale, elles divergent un peu en amplitude. Le long de la partie de la ligne interface située en amont de la paroi de dérivation, les valeurs extraites des mesures sont généralement plus petites que celles simulées. A la sortie, des nuances de courbure sont perceptibles.

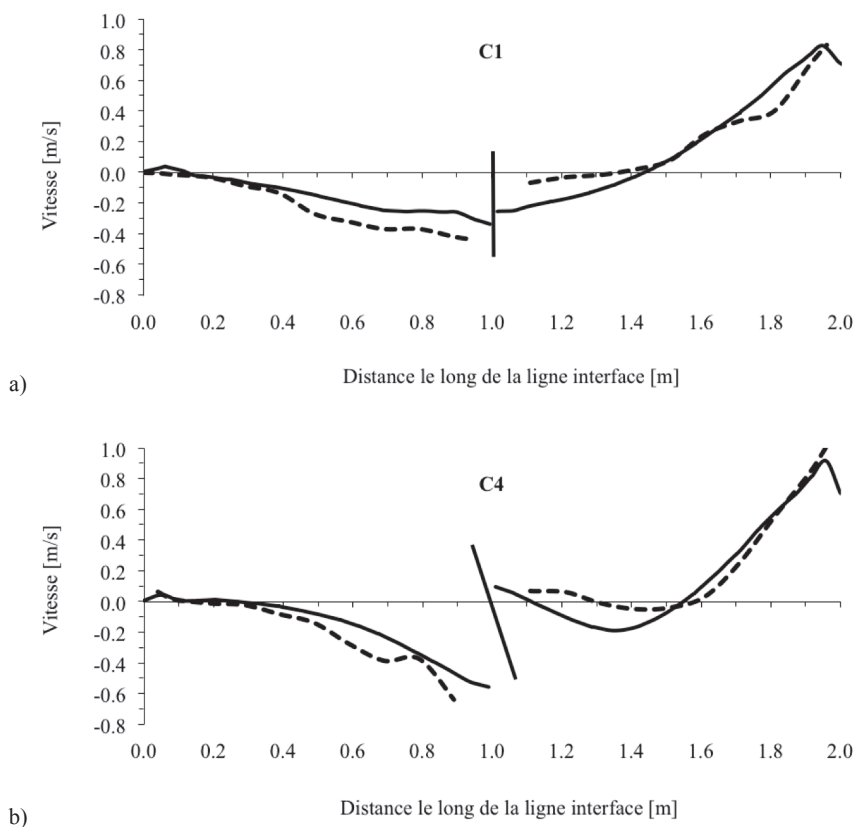


Figure 4.19: Distribution des composantes normales de vitesses, le long de la ligne d'interface entre le refuge et le canal, simulation Basement 2D en trait plein ; moyenne des mesures au micromoulinet en traitillé. a) configuration C1, b) configuration C4. Le trait incliné indique la position et l'orientation de la paroi. L'origine de la distance est à l'angle d'entrée du refuge.

Concernant les hauteurs d'eau (Figure 4.20a et b), les valeurs simulées et mesurées sont proches, avec une légère tendance à l'exagération pour les hauteurs simulées. Les hypothèses expliquant ses différences sont probablement à rechercher dans le traitement de l'échange de quantité de mouvement contre la paroi de dérivation, par BASEMENT 2D. Mais les écarts insignifiants n'ont pas justifié un examen approfondi au delà de la comparaison des vitesses présentées au chapitre suivant.

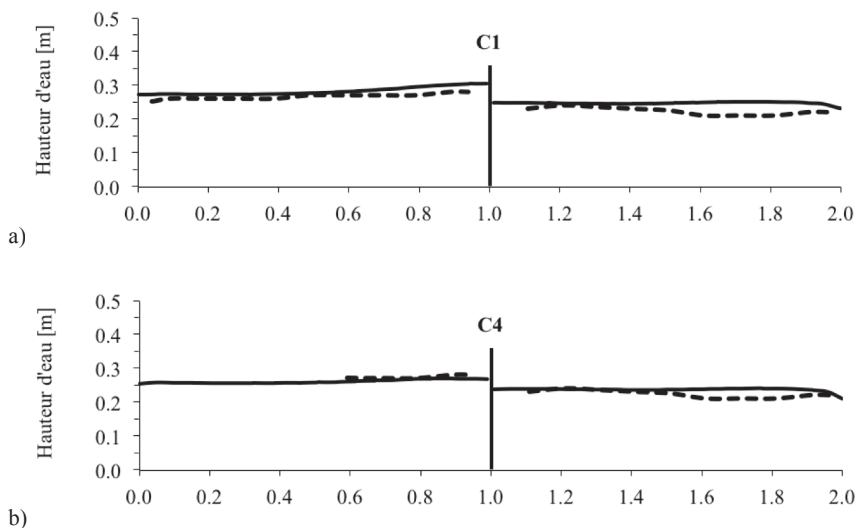


Figure 4.20: Hauteurs d'eau le long de la ligne d'interface entre le refuge et le canal, simulation Basement 2D en trait plein; mesures à la pointe limnimétrique en traitillé. a) configuration C1, b) configuration C4. Le trait vertical indique la position de la paroi.

4.5.3 Corrélation entre les vitesses mesurées et simulées

La figure 4.21 montre la relation qui existe entre les vitesses moyennes d'écoulement issues des mesures au micromoulinet et celles calculées avec BASEMENT 2D. Pour chacune des 2 configurations documentées à savoir C1 et C4, 22 paires de valeurs correspondant aux profils verticaux jaugés (Figure 4.17), sont constituées. Disposées les unes et les autres respectivement en abscisse et en ordonnée, des régressions linéaires sont produites pour l'ajustement. Dans les 2 cas, le coefficient de corrélation est supérieur à 0.9, alors que la pente de la droite est voisine de 1.0, alors que le passage par l'origine est forcé. A la vue de ces résultats, il est possible de conclure que les résultats de BASEMENT 2D tiennent bien la comparaison avec les valeurs mesurées, considérées comme une référence fiable. Ces comparaisons ont valeur de validation des simulations BASEMENT 2D, en particulier pour le calcul des débits qui circulent dans le refuge.

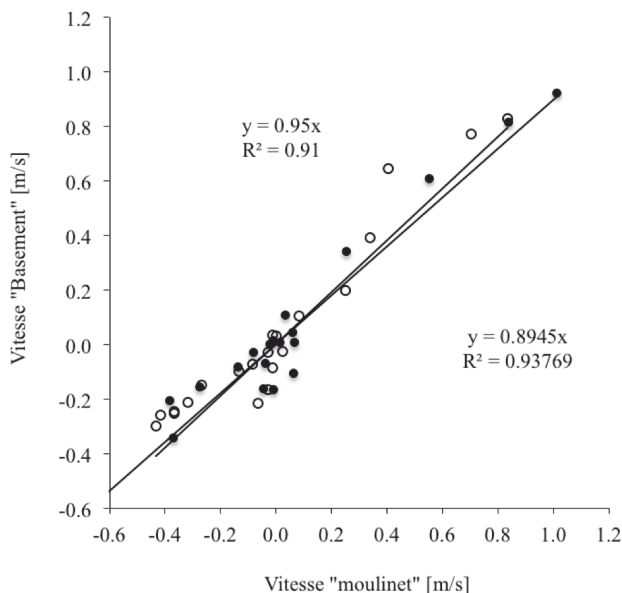


Figure 4.21: Comparaison des vitesses d'écoulement le long de la ligne interface. Les points noirs correspondent à la configuration C1, les blancs à la configuration C4.

4.6 Calcul du débit dérivé

4.6.1 Importance du débit dérivé

Comme cela est apparu lors de l'examen visuel des champs de vitesse produits par BASEMENT 2D, la dérivation d'eau dans le refuge est marquée par un couloir de circulation principal relativement étroit en regard des espaces disponibles. La formation de ce couloir est le résultat de l'installation d'une paroi de dérivation. Une fois ce concept d'aménagement adopté, la question était de donner des dimensions à cette paroi, en se référant à la configuration C1. Par la suite, la configuration C6 a montré qu'il ne fallait pas réduire la longueur de pénétration de la paroi dans l'écoulement principal du canal, fixée à 0.30m. Une recherche systématique du positionnement et de l'orientation de la paroi a lors été entreprise. A tous les stades de développement, l'objectif était évidemment d'obtenir les conditions les plus attractives pour le poisson. Elles impliquent qu'il trouve facilement le refuge, qu'il y entre et qu'il y reste, lorsqu'il est menacé par les fortes vitesses d'écoulée. Implicitement, le paramètre commun à tous les éléments de ce processus est le débit qui circule dans le refuge. Il est important tout d'abord par son existence, car il constitue le signal d'attrait pour le

poisson à la sortie du refuge avant de le conduire vers les zones d'accalmie internes. Il est important ensuite par son intensité, dans une perspective d'optimisation de la configuration géométrique. Il est donc essentiel de pouvoir quantifier ce débit. Ce thème fait l'objet du chapitre suivant.

4.6.2 Distinction entre le débit dérivé et le débit échangé

Avant de se concentrer sur le débit dérivé vers le refuge, il convient de le distinguer du débit échangé entre le refuge et le canal, ces 2 notions pouvant prêter à confusion. S'agissant des résultats de BASEMENT 2D, le débit par unité de hauteur d'eau est obtenu par l'intégration des vitesses normales le long de la ligne interface. En multipliant ce résultat intermédiaire par la hauteur d'eau on obtient le débit. Comme l'indiquent les diagrammes présentés sur la figure 4.19, les valeurs de vitesses sont successivement positives, quand le vecteur est dirigé vers l'intérieur du refuge, et négatives quand le vecteur est orienté en sens opposé. Dès lors le débit résulte d'un bilan de flux entrant et sortant du refuge. En écoulement permanent, les débits qui entrent et sortent du refuge sont équivalents. Le bilan intégral des débits le long de la ligne interface doit donc être nul. Le débit échangé correspond à la somme des flux positifs ou négatifs le long de cette même ligne, en faisant abstraction de la présence de la paroi de dérivation (Figure 4.22a). Bien qu'intéressante, cette information n'est toutefois pas significative de la circulation de l'eau dans le refuge.

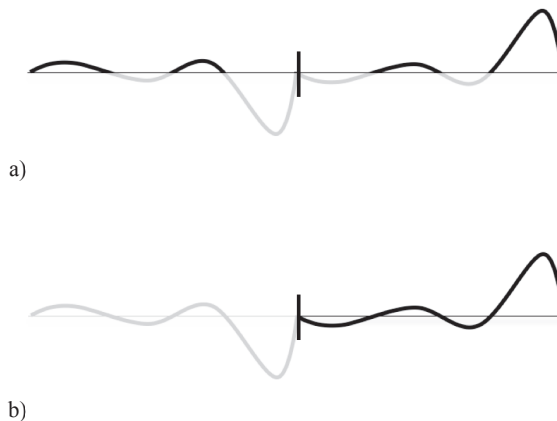


Figure 4.22: Profil de vitesses fictif le long de la ligne interface, composé de 2 parties identiques mais renversées autour de l'axe horizontal, pour une lecture visuelle des surfaces concernées. La jonction au centre correspond à la position de la paroi de dérivation. En noir, la partie du profil de vitesses qui sert à déterminer : a) le débit échangé le long de la ligne interface, b) le débit dérivé dans le refuge.

L'information recherchée est bien le débit dérivé dans le refuge. Il s'agit du débit qui entre dans le refuge par la partie de la section interface située en amont de la paroi de dérivation, et qui en ressort en aval après avoir contourné ladite paroi. Compte tenu de la règle des signes admise pour les vitesses normales, le débit entrant est considéré comme négatif alors que le débit sortant est positif. Leur somme étant nulle par définition, c'est le débit sortant qui est retenu comme significatif (Figure 4.22b). Selon le principe décrit, les 2 débits ont été calculés pour chaque configuration et sont mis en relation sur la figure 4.23.

La droite de régression qui en découle est caractérisée par un rapport constant entre l'un et l'autre débit qui vaut 0.73, avec une correction de 0.45 l/s sur le débit dérivé. Ces 2 indicateurs sont toutefois bien corrélés. Remarquons au passage que le débit échangé est plus important que le débit dérivé. Par la suite, il ne sera question que du débit dérivé.

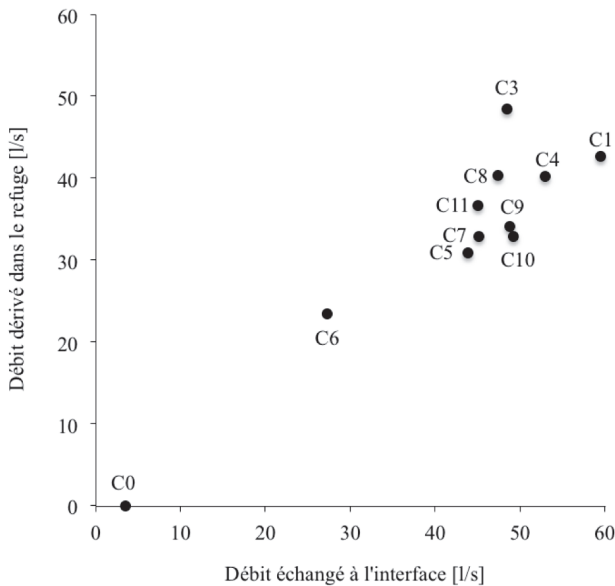


Figure 4.23: Débit échangé à l'interface entre le canal et le refuge, mis en relation avec le débit dérivé vers le refuge, pour chaque configuration. Régression linéaire: $y = 0.73x + 0.45$, $R^2 = 0.95$.

4.6.3 Valeurs et analyse des débits dérivés vers le refuge

Toutes configurations confondues, les débits dérivés s'étendent entre 0 et 48.5 l/s (Figure 4.24) avec une moyenne de 33.3 l/s et un écart type de 12.3 l/s. En excluant la configuration C0 qui se différencie de toutes les autres par l'absence de paroi de dérivation, la moyenne s'élève à 36.3 l/s et l'écart type s'abaisse à 6.7 l/s.

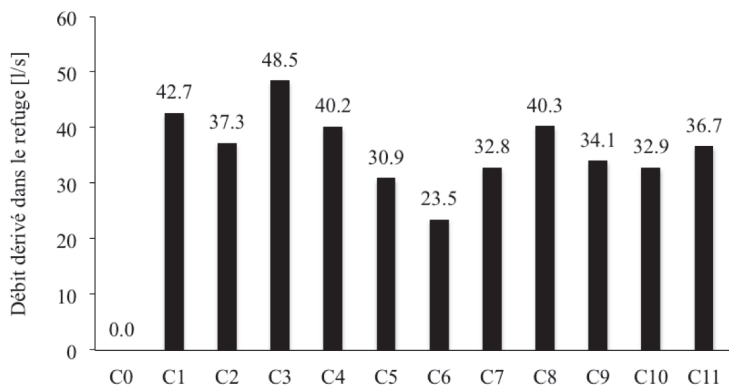


Figure 4.24: Valeur du débit dérivé vers le refuge, pour l'ensemble des configurations. Débit total dans le canal de 220 l/s.

Afin d'examiner l'influence de l'orientation et de la position de la paroi de dérivation, les configurations sont classées en ordre décroissant du débit dérivé, et leurs caractéristiques géométriques sont reportées dans le tableau 4.1. Il est intéressant de remarquer tout d'abord le débit élevé de la configuration C1, choisie comme référence en raison du fait que la position de la paroi passe par les 3 points fixes de toutes les autres configurations (Figure 3.12). Puis l'attention est attirée par les valeurs décroissantes entre C3, C8, C4 et C9, toutes 4 ayant en commun l'angle d'orientation de la paroi de dérivation de 60° à l'entrée. Les configurations C3 et C8 présentent une similitude du fait que leur largeur amont est identique. Le plus petit débit dérivé de la configuration C8, à comparer avec C3, est associé à une plus petite longueur aval (Figure 3.14) pour la configuration C8. Quant à la réduction de débit observé entre C3, C4 et C9, elle est liée à l'augmentation de la largeur amont. La configuration C6, comparable à C4, entre également dans cette catégorie. Son très petit débit s'explique par la plus petite longueur de pénétration de la paroi dans l'écoulement principal. Quant au groupe de configurations caractérisées par un angle d'orientation de 120° de la paroi de dérivation, soit C2, C11, C10, C7 et C5, il apparaît que leur classement est lié à la croissance de la largeur aval, alors que la forme compliquée de C7 ne produit qu'un débit modeste.

Configuration		C3	C1	C8	C4	C2	C11	C10	C9	C7	C5	C6	C0
Débit dérivé	l/s	48.5	42.7	40.3	40.2	37.3	36.7	34.1	32.9	32.8	30.9	23.5	0
	%	22	19	18	18	17	17	15	15	15	14	11	0
Largeur amont	m	0.60	0.99	0.60	0.99	1.38	0.81	1.17	0.81	0.99	0.99	0.99	-
Largeur aval	m	1.38	0.99	0.60	0.99	0.60	0.81	0.81	1.17	0.99	0.99	0.99	-
Largeur totale	m	1.98	1.98	1.20	1.98	1.98	1.62	1.98	1.98	1.98	1.98	1.98	2.00
Angle amont	°	60	90	60	60	120	120	120	60	120	120	60	-
Angle aval	°	60	90	120	60	120	60	120	60	60	120	60	-

Tableau 4.1: Configurations classées en ordre décroissant du débit dérivé, avec leurs caractéristiques géométriques respectives.

Il est intéressant de remarquer tout d'abord le débit élevé de la configuration C1, choisie comme référence en raison du fait que la position de la paroi passe par les 3 points fixes de toutes les autres configurations (Figure 3.12). Puis l'attention est attirée par les valeurs décroissantes entre C3, C8, C4 et C9, toutes 4 ayant en commun l'angle d'orientation de la paroi de dérivation de 60° à l'entrée. Les configurations C3 et C8 présentent une similitude du fait que leur largeur amont est identique. Le plus petit débit dérivé de la configuration C8, à comparer avec C3, est associé à une plus petite longueur aval (Figure 3.14) pour la configuration C8. Quant à la réduction de débit observé entre C3, C4 et C9, elle est liée à l'augmentation de la largeur amont. La configuration C6, comparable à C4, entre également dans cette catégorie. Son très petit débit s'explique par la plus petite longueur de pénétration de la paroi dans l'écoulement principal. Quant au groupe de configurations caractérisées par un angle d'orientation de 120° de la paroi de dérivation, soit C2, C11, C10, C7 et C5, il apparaît que leur classement est lié à la croissance de la largeur aval, alors que la forme compliquée de C7 ne produit qu'un débit modeste.

Des corrélations ont été recherchées entre le débit dérivé et les autres paramètres tels que les vitesses maximales, les longueurs amont et aval. Concernant la figure 4.25, la disposition des points suggère un accroissement du débit dérivé lié à celui de la vitesse maximale. Au contraire, la figure 4.26 montre un accroissement du débit dérivé dépendant de la décroissance de la longueur amont. Quant à la longueur aval, elle ne semble pas influencer de manière marquée la variation du débit dérivé (Figure 4.27).

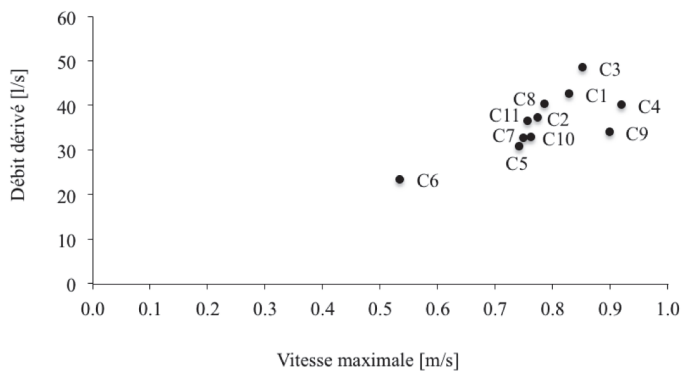


Figure 4.25: Débit dérivé dans le refuge mis en relation avec la vitesse maximale le long de la ligne interface entre le refuge et le canal.

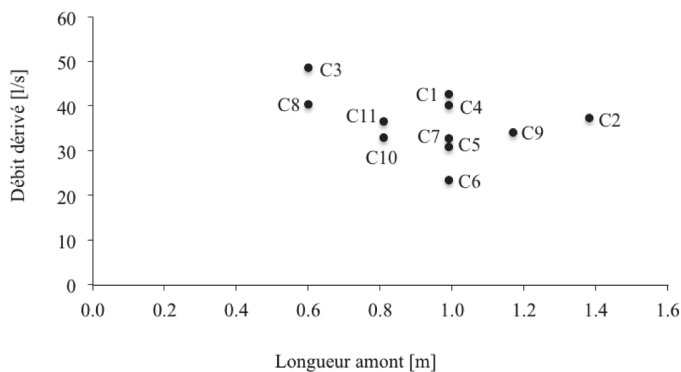


Figure 4.26: Débit dérivé dans le refuge mis en relation avec la longueur de la ligne interface située en amont de la paroi de dérivation.

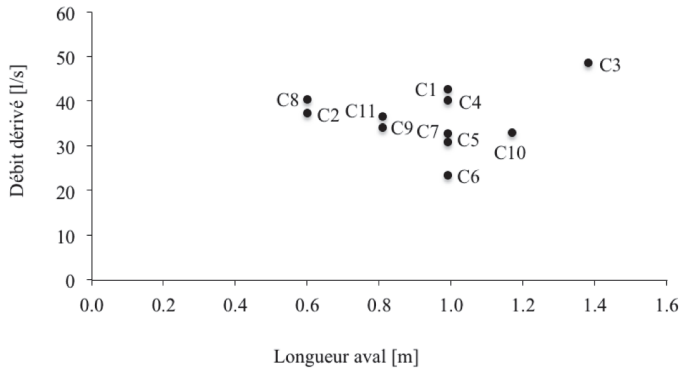


Figure 4.27: Débit dérivé dans le refuge mis en relation avec la longueur de la ligne interface située en aval de la paroi de dérivation.

4.7 Conclusion des simulations numériques

4.7.1 Simulations hydrauliques 3D avec SSIIM

Les simulations hydrauliques 3D avec SSIIM, ont permis de définir la largeur minimale du canal expérimental de la Maigrauge, fixée à 1.20m. Elles ont aussi servi à montrer que les composantes verticales de vitesses n'étaient pas significatives des écoulements dans ce même canal, lorsque que le débit maximum est limité à 220 l/s.

4.7.2 Champs de vitesses d'écoulement simulés avec BASEMENT 2D

Les simulations 2D avec BASEMENT ont été effectuées avant tout dans le cadre de la génération de configurations. Le but des essais étant de maximiser le taux de présence de poissons dans le refuge, fallait-il se convaincre préalablement que les différentes configurations prévues offraient bien une grande diversité des conditions d'écoulement. Si la perturbation induite par la présence de la paroi de dérivation produit les mêmes structures d'écoulement, la largeur du couloir de circulation du débit dérivé, de même que la forme et la grandeur des cellules de rotation dans le refuge sont bien diversifiées.

4.7.3 Profils de vitesses le long de la ligne interface

Des simulations 2D sont tirés les profils de vitesses le long de la ligne qui constitue l'interface entre le canal principal et le refuge. Les vitesses extrêmes en sont extraites pour comparaison comme éléments représentatifs des profils. Là aussi, la diversité offerte par les différentes

configurations est étendue. En fait la présence de la paroi de dérivation coupe la ligne interface en 2 parties. Dans chacune, la distribution est caractérisée par une vitesse de pointe apparente sur le tracé du couloir de circulation du débit dérivé, et par un point de cisaillement.

4.7.4 Débit dérivé dans le refuge

Une autre contribution des simulations 2D est le calcul du débit dérivé dans le refuge, par intégration du profil de vitesses normales, dans la section interface. Selon les configurations ce débit représente de 15 à 22% du débit total qui s'écoule dans le canal. Des corrélations entre le débit dérivé et les paramètres géométriques et hydrauliques du refuge sont examinées.

A ce stade, il serait possible d'approfondir l'analyse en recherchant par exemple un lien de cause à effet entre l'orientation, respectivement la position, de la paroi de dérivation et le débit dérivé. Toutefois la réponse hydraulique qui en ressortirait ne présenterait un intérêt que dans le cas où l'attractivité du refuge pour le poisson varie comme le débit dérivé, ce qui reste à vérifier. Dès lors les résultats de ce chapitre, concernant les valeurs de débits dérivés et les vitesses extrêmes dans la section interface, seront exploités au chapitre 7.

5 EXPERIMENTATION AVEC LES POISSONS

5.1 Déroutement des essais

5.1.1 Pêches électriques

Les essais avec les poissons ont eu lieu au cours de 4 périodes relatives aux 4 pêches électriques réalisées au Tannenbach. La mise en œuvre s'est déroulée conformément à la description faite au chapitre 3.4. Chaque configuration est testée 3 fois, la première avec les poissons qui disposent de leur nageoire adipeuse, la seconde avec les autres dont l'adipeuse est coupée, et la dernière avec la totalité des individus. Les effectifs détaillés figurent au tableau 3.3, le calendrier des essais est donné au tableau 5.1, et les longueurs de poissons au tableau 5.2.

Date de pêche	Configuration	Essai a) Poissons avec nageoire adipeuse	Essai b) Poissons sans nageoire adipeuse	Essai c) Totalité des poissons
08.09.08	C0	<i>11.09.08</i>	<i>10.09.08</i>	12.09.08
	C1	15.09.08	16.09.08	18.09.08
14.10.08	C2	<i>20.10.08</i>	27.10.08	23.10.08
	C3	28.10.08	03.11.08	10.11.08
	C4	04.11.08	06.11.08	07.11.08
15.05.09	C5	<i>20.05.09</i>	<i>22.05.09</i>	25.05.09
	C6	28.05.09	28.05.09	02.06.09
	C7	04.06.09	04.06.09	05.06.09
05.10.09	C8	21.10.09	21.10.09	19.10.09
	C9	<i>08.10.09</i>	<i>08.10.09</i>	12.10.09
	C10	16.10.09	16.10.09	14.10.09
	C11	23.10.09	23.10.09	26.10.09

Tableau 5.1: *Calendrier des pêches électriques et des essais avec les poissons. En italique, la 1^{ère} mise en situation des poissons.*

Date de la pêche électrique		08.08.08	14.10.08	15.05.09	05.10.09
Nombre de poissons pêchés		21	22	33	20
Longueur moyenne	mm	165	164	125	151
Longueur maximale	mm	196	196	161	187
Longueur minimale	mm	139	139	88	107
Ecart type	mm	19	17	18	18

Tableau 5.2: Longueur des truites fario pêchées au Tannenbach, à Büttisholz (LU), Suisse.

5.1.2 Conditions hydrauliques des essais

Chaque essai débute par le transvasement des poissons de l'aquarium vers le canal. Afin de réduire le stress occasionné, ils sont placés en tête du canal, dans un compartiment limité en amont par la grille d'entrée et en aval par une grille amovible (Figures 5.2a et b). Couvrant la largeur du canal cet espace d'une longueur de 2.00 m, offre une surface d'acclimation de 2.40 m² pour une hauteur d'eau moyenne de 0.10 m. Avec un débit de 10 l/s, maintenu durant 15 minutes, la vitesse moyenne de l'écoulement ne dépasse pas 0.10 m/s, ce qui équivaut à la valeur maximale de l'indice de préférence des vitesses pour la truite fario juvénile, soit 1.0 selon Vismara & al, 2001 (Figure 5.1). La notion d'indice de préférence est développée aux chapitres 2.4.8 et 3.2.1.

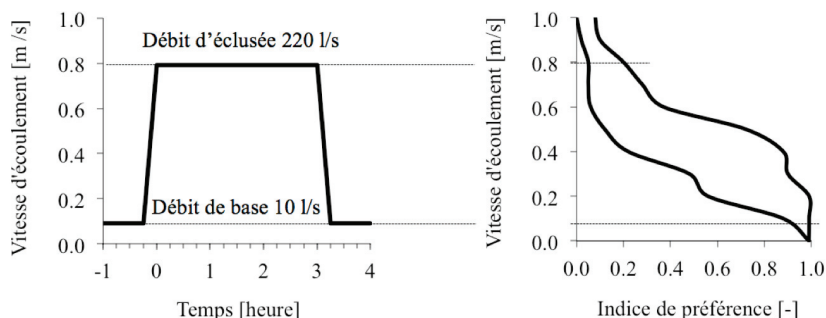


Figure 5.1: Vitesses d'écoulements dans le canal lors des essais, mis en relation avec l'indice de préférence des vitesses pour la truite fario au stade juvénile, tiré de Vismara & al. 2001 (Figure 2.1).

Puis, le débit est rapidement augmenté à 220 l/s. Le rapport entre le débit de base et le débit d'éclusee est donc de 1/22. Simultanément la grille limitant le compartiment d'acclimation est retirée et les poissons sont libérés. Avec une hauteur d'eau générale de 0.24 m, le débit

susmentionné occasionne une vitesse moyenne dans le canal qui est de l'ordre de 0.8 m/s (voir chapitre 3.2.6), ce qui place le poisson en situation de danger d'ailleurs exprimé par un indice de préférence qui tombe en dessous de 0.2 (Figure 5.1). La situation d'éclusee ainsi reconstituée, est maintenue durant 3 heures au cours desquelles les déplacements des poissons sont observés, la température de l'eau est enregistrée et la stabilité du débit et des niveaux d'eau régulièrement vérifiée. Les conditions hydrauliques régnautes sont résumées par le tableau 5.3.

Scénario	Débit	Hauteur d'eau	2) Section nette	Vitesse moyenne	3) Indice vitesse	Nombre Froude
Base	10 l/s	0.10 m	0.11 m ²	0.09 m/s	0.9 à 1.0	0.09
Eclusee	220 l/s	1) 0.24 m	0.27 m ²	0.79 m/s	0.1 à 0.2	0.53

Tableau 5.3: Paramètres hydrauliques moyens dans le canal principal, lors des essais avec les poissons. 1) Hauteur d'eau prise 2m avant la grille de sortie du canal. Cette hauteur est de l'ordre de la hauteur normale avec la pente du canal à 0.44 % et la rugosité à 56 m^{1/3}/s (voir chapitre 3.2.6). 2) Section brute déduite des façonnages de pied de parois en triangle 0.1/0.1m. 3) Indice de préférence de vitesses selon figure 2.1. Le rapport des débits est de 1/22.

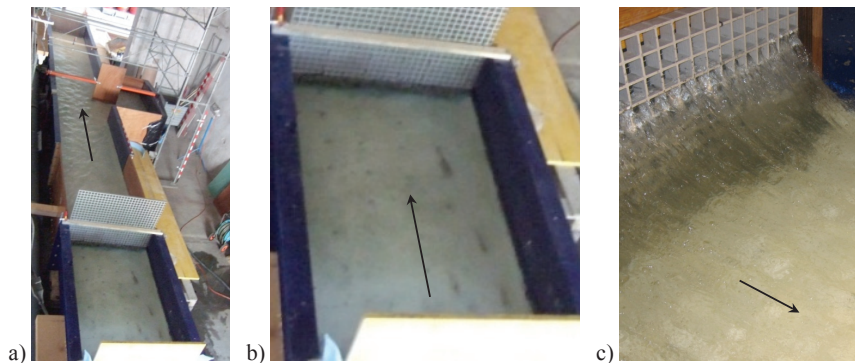


Figure 5.2: a) Vue d'ensemble du canal, entrée en bas de l'image, b) Détail du compartiment d'acclimation, avec la grille provisoire, c) Rouleau d'eau au pied de la grille d'entrée.

Les difficultés rencontrées pour le maintien des niveaux d'eau méritent d'être explicitées. En effet, à l'avantage de disposer d'un écoulement d'eau de rivière est associé l'inconvénient de l'acheminement de grandes quantités de feuilles. Gorgées d'eau, elles s'accumulent contre les grillages d'entrée et de sortie du canal. Durant les périodes de forte production, un suivi

continuel et de fréquentes opérations d'extraction se sont avérés nécessaires afin d'éviter les débordements à l'entrée et de stabiliser le niveau d'eau à la sortie.

5.1.3 Conditions de température et d'éclairage

La température de l'eau a été mesurée en continue durant toute la période d'étude (Figure 5.3) avec une période de défaillance du capteur. Les périodes d'essais ont été définies en fonction de la température de l'eau de sorte que les poissons soient mis en condition optimale de ce point de vue. En effet, il a été relevé au chapitre 2.4.6 que la température optimale pour les juvéniles de truites fario était comprise entre 6 et 14°C. Le tableau 5.4 donne les températures moyennes durant ces périodes ainsi que leur écart type.

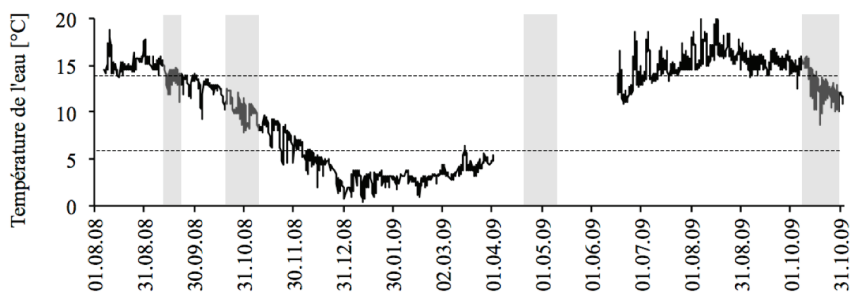


Figure 5.3: Température de l'eau de la Sarine à la prise d'alimentation du canal de la Maigrauge. Les bandes grises indiquent les périodes d'essais. Les traitillés indiquent les température limites entre lesquelles le comportement de la truite n'est pas influencé.

Période d'essais	11.09-18.09.08	20.10-07.11.08	20.05-05.06.09	08.10-26.10.09
Température moyenne	14.1°C	10.6°C	≈ 10°C	13.5°C
Ecart type	0.9°C	1.1°C	-	1.5°C

Tableau 5.4: Température moyenne et écart type durant les périodes d'essais avec les poissons. Pour la période du 20.5 au 05.06.2009, la moyenne est estimée à partir des valeurs mesurées durant les essais.

Concernant l'éclairage, la pénombre était maintenue dans la partie utile du canal, soit sur une longueur effective de 12 m. Afin de marquer les limites de cet espace, un éclairage artificiel a été imposé aux 2 extrémités, par des spots. Cette pratique a été suivie dans le but de conserver un éclairage uniforme pour tous les essais, indépendamment des phases journalières et des nuances météorologiques de la lumière extérieure.

5.2 Stationnement des poissons et fréquentation du refuge

5.2.1 Repérages de la position des poissons

Afin de repérer la position des poissons, le dispositif expérimental a été subdivisé en 42 cellules, chacune longue de 1.00 m et large de 0.40 m. En fait les relevés se sont déroulés en distinguant la moitié droite ou gauche de la cellule, ce qui double implicitement le nombre de cellules. Tout au long des 3 heures d’essais, la position des poissons est relevée dans le canal et dans le refuge à intervalle de 20 minutes, selon le protocole suivant (Figure 5.4):

Configuration:	Nombre de poissons:												Remarque :	
Date:	Température de l’eau: °C												Opérateurs:	
Heure:														
	1m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m	11m	12m		
Paroi gauche														
Centre														
Paroi droite														
Refuge entrée														
Refuge milieu														
Refuge paroi														

Figure 5.4: Fiche de relevés de la position des poissons effectués chaque 20 minutes.

Cette opération est rendue difficile car elle se déroule dans la pénombre. De plus, l’observateur ne doit pas être vu du poisson, sans quoi il s’enfuit. De par son fond colmaté et blanchi, le canal offre un excellent contraste pour le repérage des poissons. Aucun individu présent ne pouvant échapper au regard attentif de l’observateur, les poissons présents dans le canal sont comptés en premier. Par conséquent, le solde est assurément confiné dans le refuge. Cette affirmation est toutefois dépendante de l’application de précautions inerrantes au fait que des poissons pouvaient s’immobiliser au droit des grilles placées aux extrémités du canal. Concernant la grille amont, elle génère à son pied, un rouleau d’eau (Figure 5.2c) à l’intérieur duquel les poissons semblent trouver refuge. Cette particularité constituant un effet indésirable induit par les limites du dispositif, les poissons présents en sont régulièrement éloignés, à la main. Quant à l’extrémité aval, il s’agit d’extraire les individus affaiblis qui se trouvent plaqués latéralement par le courant contre la grille. Dans tous les cas, une grande attention a été prêtée pour ne pas chasser les poissons qui s’immobilisent à proximité des grilles, hors de ces zones particulières. Enfin, la validité de cette procédure étant totalement dépendante de la visibilité des poissons dans le canal, certains essais ont été reportés, d’autres interrompus en cas d’eau turbide.

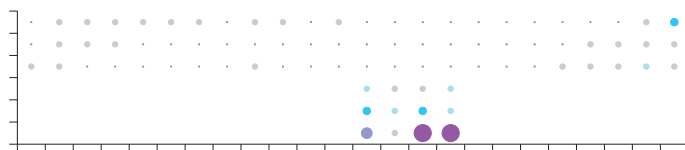
5.2.2 Positionnements préférentiels des poissons dans le refuge

Chaque essai fait l'objet de 9 relevés du nombre de poissons présents dans chaque cellule. De plus, les relevés des configurations C1 à C4 ont été transcrits à l'aide du logiciel Surfer8, sous forme de figures synoptiques. Les stationnements favoris des poissons y sont montrés par des cercles dont le diamètre est proportionnel à la densité relative d'individus dans chaque cellule. Chaque essai est tout d'abord représenté par la série des 9 valeurs relevées sur chaque cellule. Elles sont ensuite transformées en valeurs relatives par division avec le nombre de poissons en action durant l'essai. Sous cette forme, elles sont moyennées entre les 3 essais opérés pour chaque configuration, au droit de chaque cellule. Chaque cercle est donc représentatif de 27 relevés (Figure 5.6). Si pour la configuration C0, les truites se dispersent sur tout l'espace disponible, les configurations C1 à C4 sont caractérisées par des emplacements à plus haute densité, dans le refuge. Les poissons se rassemblent dans les angles du refuge et le long de la paroi vitrée (Figure 5.5). Pour la configuration C3 une concentration se forme derrière la paroi de dérivation.

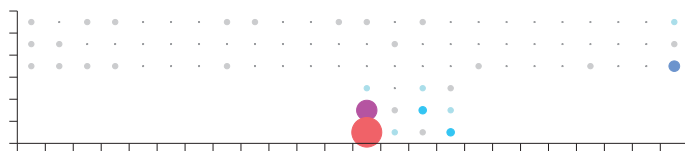


Figure 5.5: Configuration C1, poissons immobilisés le long la vitre du refuge (photo K. Steffen, 2008)

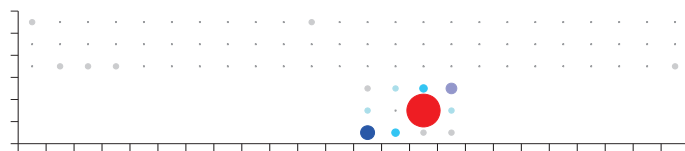
C1



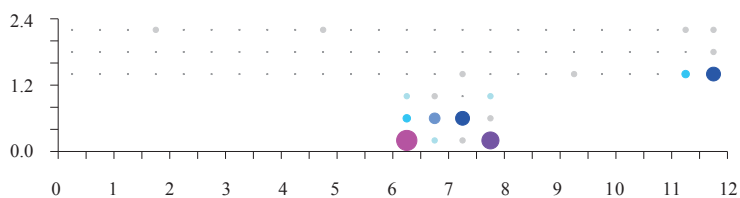
C2



C3



C4



Distance le long du canal [m], origine à l'entrée du canal

Echelle de densité : 0 5 10 15 20 25 %

Figure 5.6: Densité de poissons présents dans les cellules pour les configurations C0 à C4, moyennée sur les 3 essais relatifs à chaque configuration (Steffen, 2009).

A la suite de l'analyse des 5 premières configurations, une réflexion a été menée au sujet du degré de détail requis par cette recherche. En effet, est-il nécessaire de connaître la position des poissons dans le refuge pour juger de son attractivité ? Cette question est née des observations. Si pour entrer dans le refuge les poissons suivent une voie tracée, une fois à l'intérieur du refuge ils se positionnent et se déplacent de manière beaucoup plus détachée des conditions hydrodynamiques, du fait d'une activité ralentie. Il est clair qu'aux endroits où ils se regroupent, des tourbillons ou des frémissements d'eau sont apparents. Mais l'existence de ces particularités n'est assurément pas perceptible à l'extérieur du refuge. Cette interprétation a été retenue pour conclure que la connaissance du positionnement détaillé des poissons dans le refuge n'est pas une information nécessaire dans l'étude de l'attractivité globale du refuge. De fait, il a été admis que l'étude du comportement des poissons dans le refuge, sortait du cadre de cette recherche. C'est pourquoi, cette analyse n'a pas été poursuivie. Les 324 fiches détaillées (idem Figure 5.4) sont à disposition à l'état brut ou sous forme de fichiers Excel.

5.2.3 Taux de présence instantanés de poissons dans le refuge

Suite à la décision prise de ne pas considérer la position détaillée des poissons dans le refuge, c'est le nombre total d'individus présents dans le refuge qui est la grandeur significative de son attractivité. De ce fait, le nombre de poissons qui se trouvent dans le refuge, est obtenu par le cumul des valeurs observées dans les cellules respectives, au moment du comptage. Comme le nombre de poissons impliqués varie entre les essais (Tableau 5.5), il est nécessaire de relativiser les valeurs. En effet, 2 essais se déroulaient avec l'une et l'autre moitié de l'effectif et le dernier avec l'ensemble de l'effectif. De plus, l'effectif a varié de quelques unités selon les pêches.

Configuration	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
Effectif pêché	21		22			33			20			
Effectif essai a 1)	11	11	9	11	11	10	10	10	9	8	10	9
Effectif essai b 2)	10	10	11	11	11	10	10	8	9	11	10	8
Effectif essai c 3)	21	21	22	22	22	20	20	20	20	19	20	15
Effectif rendu		21			22			26				20

Tableau 5.5: *Nombre de poissons impliqués dans chaque essai, 1) groupe des poissons dont la nageoire adipeuse est intacte, 2) groupe des poissons dont la nageoire adipeuse est coupée, 3) les 2 groupes de poissons confondus. Les chiffres en caractère gras indiquent la première mise en situation du groupe de poissons.*

Le taux de présence instantané est le rapport entre le nombre de poissons présents dans le refuge au moment du comptage, et le nombre de poissons impliqués dans l'essai considéré. Les comptages ayant lieu chaque 20 minutes durant 3 heures, la courbe des taux de présence instantanés de chaque essai est constituée de 9 points, le point à l'origine exclu. Chaque configuration faisant l'objet de 3 essais, 3 courbes sont rattachées à chacune (Figures 5.7 et 5.8). L'examen visuel de ces courbes individuelles montre tout d'abord que les taux de présence instantanés sont déjà élevés lors de la première mesure, soit 20 minutes après le début de l'éclosée, sauf pour la configuration C0. Il montre aussi que les courbes relatives à chaque essai sont assez bien regroupées autour de la courbe moyenne, sauf pour les configurations C0, C9 et C10. Enfin il ne montre pas de particularités notoires pour les essais a) et b) des configurations C0, C2, C5 et C9, qui constituent la première confrontation des poissons aux conditions expérimentales. Les poissons semblent bien trouver spontanément le refuge, sauf pour la configuration C9b.

La neutralisation des particularités comportementales des poissons, justifie la répétition des essais à 3 reprises. L'objectif est donc d'obtenir pour chaque configuration, une série de valeurs pondérées à partir des résultats de 3 essais. Dès lors, il est inopportun de procéder à l'analyse et à l'interprétation des taux de présences simultanés, avant d'avoir procédé à la pondération.

5.2.4 Taux de présence pondérés de poissons dans le refuge

Mis à part les essais interrompus dont les résultats ont été exclus, le protocole d'essais fut dans l'ensemble, assez bien respecté. Dans quelques cas il fallut sortir 1 ou 2 poissons et parfois de légères variations de température de l'eau ont été mesurées durant les essais. Mais l'examen des résultats concernés ne montre pas de disparité flagrante. De même, il n'a pas été possible d'expliquer des taux de présence instantanés fortement variables au cours de la durée d'un essai, comme C9b par exemple. Dès lors, il n'y a pas lieu d'attribuer une plus grande importance à certains essais et de remettre en question la validité d'autres. Il y a bien la question de la plus grande précision de l'essai dont l'effectif en poissons est le double des 2 autres. Finalement aucun argument de pondération ne paraissait pertinent. C'est pourquoi, les taux de présence instantanés ont été moyennés arithmétiquement en 9 séries de 3 valeurs pour chaque configuration. Cela permet de produire les courbes de taux moyens de présence tracées en superposition sur les figures 5.7 et 5.8. A partir de ces courbes, sont calculés la moyenne, l'écart type et les paramètres de la régression linéaire figurant au tableau 5.6. La procédure de calcul du taux de présence moyen de poissons dans le refuge est illustrée par la figure 5.9. Ci-après, la moyenne est appelée le taux moyen et par la suite, tout simplement le taux de présence de poissons dans le refuge.

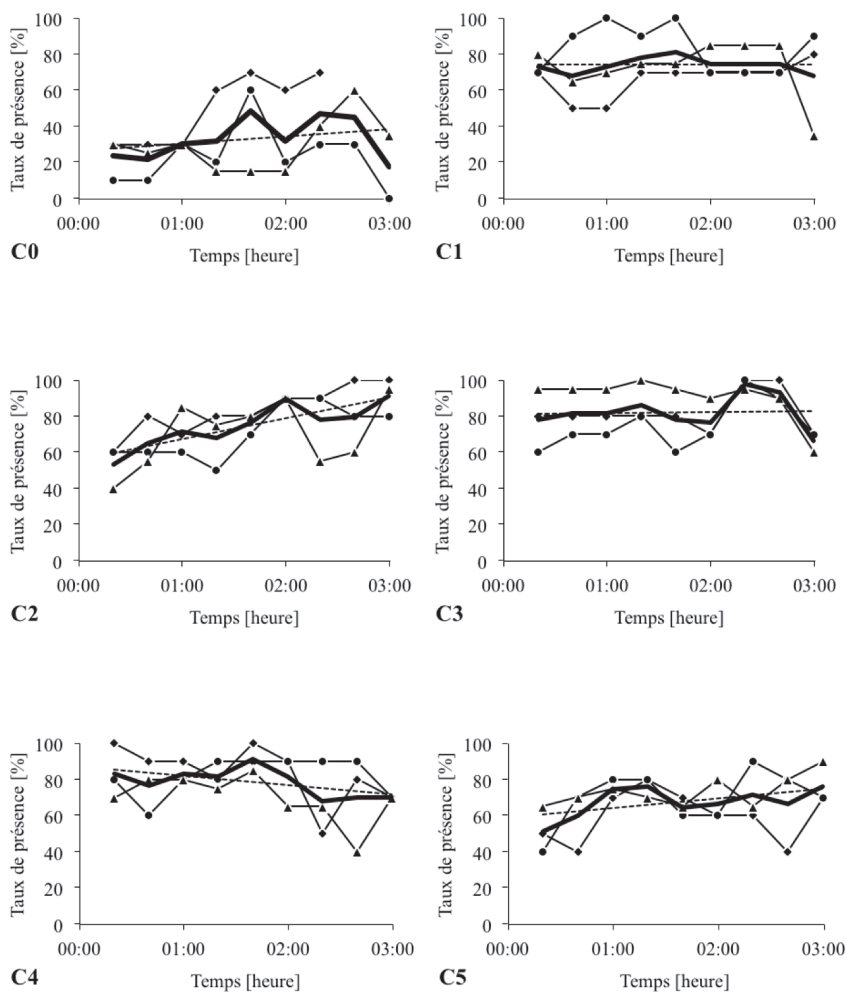


Figure 5.7: Variation temporelle du taux de présence des poissons dans le refuge pour les configurations C0 à C5. Points en losange pour essai a), points ronds pour essai b), points en triangle pour essai c), moyenne des 3 essais en trait gras, régression linéaire en traitillé.

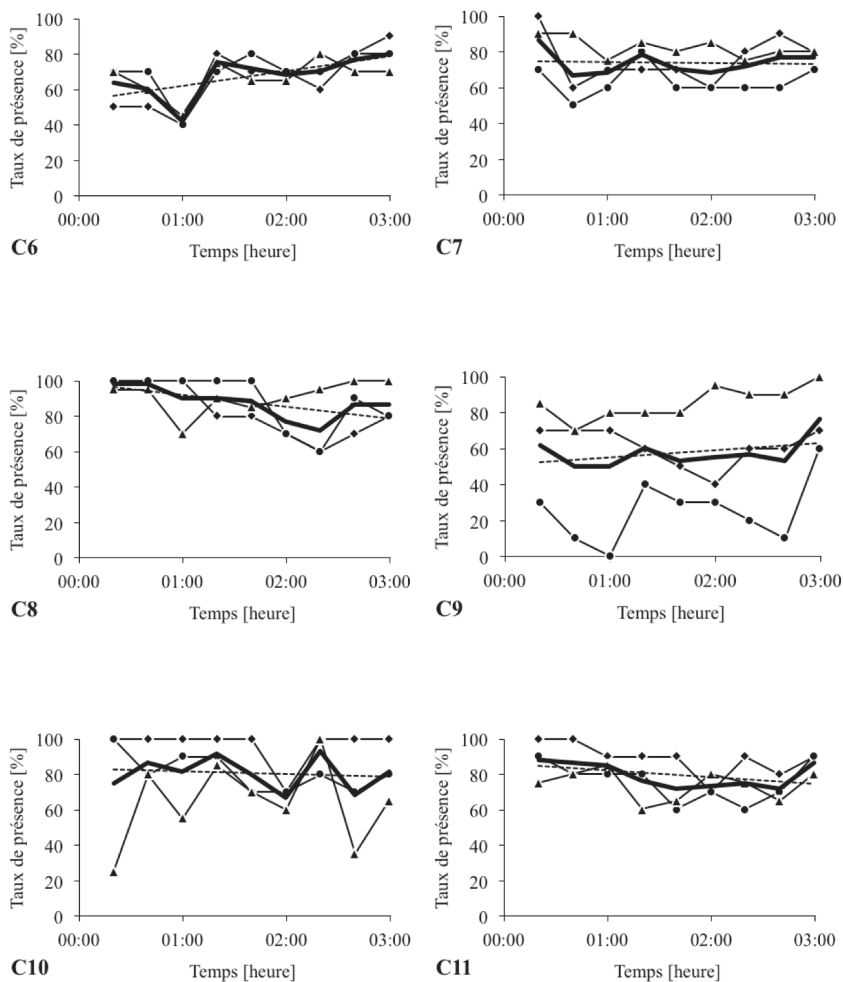


Figure 5.8: Variation temporelle du taux de présence des poissons dans le refuge pour les configurations C6 à C11. Points en losange pour essai a), points ronds pour essai, b) points en triangle pour essai, c) moyenne des 3 essais en trait gras, régression linéaire en traitillé.

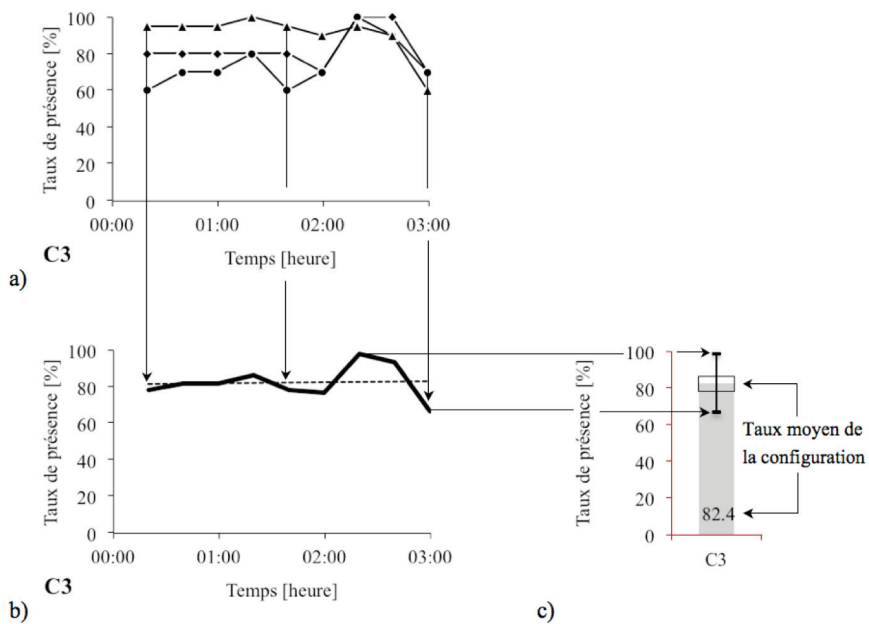


Figure 5.9: Illustration de la procédure de calcul du taux de présence moyen représentatif de chaque configuration, exemple de la configuration C3. a) Lignes des taux de présence au cours du temps pour chacun des 3 essais effectués pour chaque configuration. b) Ligne des taux moyens calculés par la moyenne arithmétique des 3 valeurs simultanées respectives. c) Diagramme à moustaches établi à partir de la ligne des taux moyens. Le taux moyen de la configuration est la moyenne arithmétique des valeurs à intervalle de 20 minutes de la ligne des taux moyens, valeur à l'origine exclue.

Configuration		C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
Taux moyen 1)	%	32.9	74.3	75.0	82.4	78.5	67.8	67.4	73.7	87.4	57.4	80.6	79.4
Ecart type 1)	%	11.4	4.3	12.1	9.4	7.8	8.3	11.5	6.4	8.8	8.3	9.4	7.1
a 2)	%/h	96	0	280	14	-124	124	200	-16	-158	94	-36	-90
b 3)	%	26.2	74.3	55.6	81.4	87.1	59.2	53.5	74.8	98.3	50.9	83.1	85.7
R ² 4)	-	0.10	0.00	0.78	0.00	0.36	0.32	0.44	0.00	0.47	0.19	0.02	0.23

Tableau 5.6: Valeurs numériques résumant le traitement de la série des taux de présence, pour chaque configuration testée. 1) Taux de présence moyen et écart type, représentatifs de la courbe moyenne des 3 essais, 2) Pente de la droite de régression, 3) Ordonnée à l'origine de la droite de régression, 4) Coefficient de détermination de la régression linéaire.

5.2.5 Analyse des taux de présence de poissons dans le refuge

Sur la base de ces données, le taux de présence des poissons dans le refuge est représenté par ses valeurs minimale, maximale et moyenne, pour l'ensemble des configurations (Figure 5.10). La moyenne des taux de présence est de 71.4% pour un écart type de 8.7%. Le taux de présence moyen le plus élevé est obtenu par la configuration C8 suivi de la configuration C3. Le taux de présence le plus faible est obtenu par la configuration C0 qui est caractérisée par l'absence de paroi. Elle est suivie par la configuration C9. Il faut cependant remarquer que ce résultat est influencé par l'essai C9b (Figure 5.8) qui pénalise les 2 autres essais qui eux montrent des taux comparables aux meilleurs résultats. Cet essai a fait l'objet d'un examen approfondi qui n'a pas débouché sur des conclusions consistantes justifiant une éventuelle exclusion de ses valeurs.

D'autre part, il est intéressant de comparer les configurations C4 et C6 dont la paroi de dérivation est implantée de manière identique. Elles se distinguent par la longueur de pénétration dans le canal principal qui est de 0.3m pour la paroi de la configuration C4 comme d'ailleurs pour toutes les autres sauf C0 (Figure 3.12). Cette longueur n'est que de 0.15m pour la configuration C6 (Figure 3.13). Le taux de présence de la configuration étant plus petit pour C6 que pour C4, on peut voir une influence de cette longueur de pénétration sur le taux de présence moyen. Les autres résultats sont groupés entre 70 et 80 %.

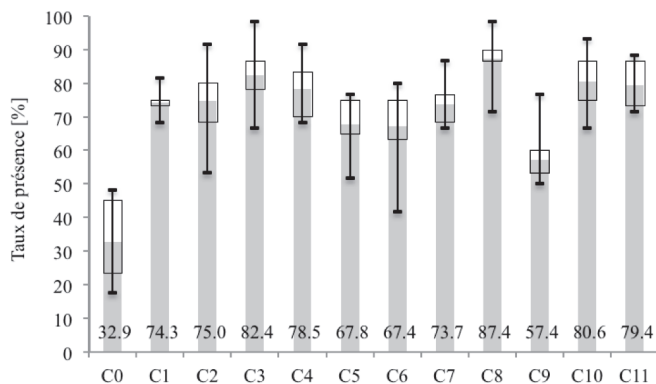


Figure 5.10: Boîtes à moustaches du taux de présence des poissons dans le refuge, moyenné sur les 3 essais effectués pour chaque configuration. La barrette grise et la valeur numérique à son pied indiquent le taux moyen. Les segments au bout des moustaches indiquent les valeurs maximales, minimales. Les côtés inférieur et supérieur de la boîte indiquent le 1^{er} et le 3^{ème} quartile.

5.2.6 Association du taux de présence avec le débit dérivé

Sur la figure 5.11, le taux de présence dans le refuge est associé au débit dérivé. Il apparaît que l'absence de débit dérivé de la configuration C0 induit un taux de présence qui, loin d'être nul, est malgré tout nettement plus faible que celui engendré par les autres configurations testées. Les observations au cours des essais pour cette configuration montraient très clairement que les poissons ne trouvaient pas le chemin vers le refuge et qu'ils y entraient par hasard. Concernant l'ensemble des configurations comprenant une paroi de dérivation, les débits sont étirés entre 23 et 49 l/s, soit 10 à 22% du débit total dans le canal, pour un taux de présence qui passe respectivement de 68 à 87%. De plus, une concentration de points a lieu dans l'intervalle 30 à 43 l/s, (soit 13 à 20% de 220 l/s), pour des taux moyens de l'ordre de 75%, la configuration C9 exclue. La nécessité d'un débit dérivé paraît donc évidente pour l'attrait du poisson. Dans le domaine couvert par les essais, l'accroissement du débit dérivé induit l'augmentation du taux de présence, quand bien même le plus grand taux de présence, celui de la configuration C8, n'est pas associé au plus grand débit dérivé. Une analyse de fonction approfondie est effectuée au chapitre 7.2.3.

En résumé, cette comparaison montre clairement que la présence de la paroi produit un important taux de présence des poissons dans le refuge (75% en moyenne). L'orientation de la paroi permet de nuancer ce taux de présence, alors que ledit taux est sensiblement diminué quand la longueur de pénétration de la paroi de dérivation dans le canal, est réduite, à

l'exemple de la configuration C6. Le taux de présence moyen augmente avec l'accroissement du débit dérivé dans le refuge. Cette observation est valable dans la limite des valeurs testées, soit quand le débit dérivé est inférieur à 22% du débit total dans le canal (Tableau 4.1).

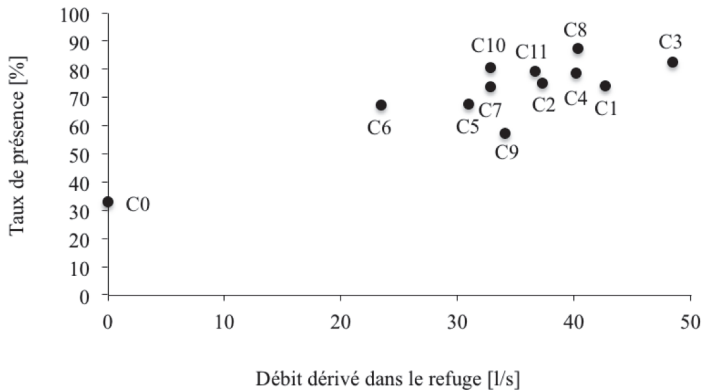


Figure 5.11: Taux présence dans le refuge en fonction du débit dérivé pour chaque configuration. Les numéros des configurations sont mentionnés soit en dessus soit en dessous du point correspondant.

5.2.7 Effet de l'habitude des poissons sur le taux de présence dans le refuge

Une question souvent posée concerne l'influence de l'habitude prise par les poissons au cours des essais sur le taux de présence dans le refuge. Quelques investigations ont été menées en vue de se prononcer sur cette question. Sur les figures 5.7 et 5.8 sont présentées les droites de régressions découlant des séries chronologiques moyennes des taux de présence, pour chaque configuration. En considérant la pente de ces droites, les configurations peuvent être classées en 3 catégories : Celles où les poissons sont mis pour la première fois en situation, à savoir les configurations C0, C2, C5 et C9, pour lesquelles la pente est positive ; celles où les poissons ont été sollicités plusieurs fois, pour lesquelles la pente est négative ; et les autres en situation intermédiaire. La comparaison montre donc un basculement de la pente de la droite de régression au cours du temps. Cette observation se confirme pour les 4 séries de poissons correspondant au 4 pêches au Tannenbach. Face à toute interprétation envisageable, il convient de remarquer que les variations sont de l'ordre de 10 à 15 % sur les 3 heures que dure chaque essai, légèrement plus importante pour la configuration C2. Cela équivaut à 1 ou 2 poissons présents ou absents du refuge. Il est de ce fait possible de conclure que l'habitude influence probablement le taux de présence mais de manière subsidiaire, quand bien même une pareille attitude n'est pas contre nature.

5.3 Cheminement des poissons, distribution des passages

5.3.1 Installation de la caméra vidéo

Afin de suivre la trajectoire des poissons, une caméra vidéo a été installée en surplomb du canal à l'endroit du refuge (Figure 3.5). Précisément, la caméra de type JVC GZ-HD7E, regarde vers le bas, à 5 mètres au dessus du fond du canal, sur un axe vertical positionné sur la ligne marquant l'interface entre le canal et le refuge, à mi-distance entre les 2 angles du refuge. Elle couvre une largeur de 2.4 m correspondante à celle du canal et celle du refuge cumulées, et une longueur de 4.3 m du canal, répondant au format vidéo 16/9 (Figure 5.12). Chaque essai est filmé durant les 3 heures, ce qui représente 108 heures d'enregistrement au total, à raison de 30 images par seconde.

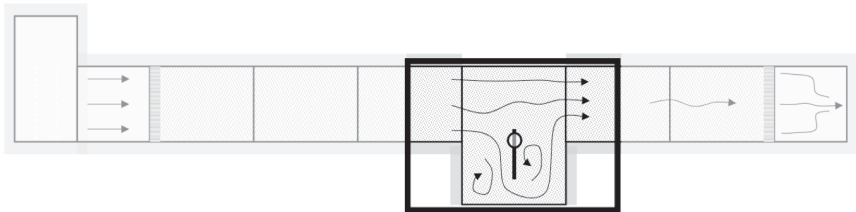


Figure 5.12: Champ optique (rectangle noir) et position de la caméra vidéo (cercle noir)

5.3.2 Analyse des enregistrements vidéo

Concernant l'analyse de ces enregistrements, il y a lieu de rappeler que l'objectif est d'associer des vitesses d'écoulement aux positions successives des poissons. Dans ce but, la démarche consiste à retracer les trajectoires des poissons à partir des vidéos et de produire la série des vitesses d'eau le long de ces trajectoires. Comme cela a été exposé au chapitre 4.1, il est possible de tirer cette série en retraçant une trajectoire sur un champ de vitesses simulé avec BASEMENT 2D, par l'intermédiaire du logiciel SMS. Cette approche est cependant restreinte au fait que les vitesses d'écoulement sont des moyennes sur la verticale, qui ne sont pas forcément équivalentes aux valeurs rencontrées à la profondeur où nagent les poissons. Pour cette raison, des mesures de vitesses réelles ont été jugées nécessaires. Cette question est développée au chapitre 6.

A propos de la reconnaissance de la trajectoire des poissons, une collaboration a été entreprise avec le Laboratoire de Vision par Ordinateur (CVLAB-EPFL) pour le traitement numérique des images. Les tentatives se sont avérées infructueuses du fait que les inévitables reflets sur le plan d'eau ondulant produisent des signaux parasites qui dissimulent le déplacement du

poisson, lui-même très petit par rapport à l'étendue des images, et peu visible à cause de la pénombre ambiante. Toute amélioration tentée s'est heurtée au problème de la perturbation du comportement des poissons. Pour cette raison, il a été décidé de renoncer à cette numérisation et de procéder de visu.

Si la numérisation offrait l'avantage de laisser toute liberté pour le choix de sections de contrôle, la décision de procéder de visu demande la définition préalable desdites sections, pour limiter l'étendue du travail. En l'occurrence c'est bien entendu, la section qui constitue l'interface entre le canal et le refuge qui s'impose comme référence. La procédure consiste à compter le nombre de passages dans chaque segment de 0.10 m constituant la ligne interface, en distinguant les entrées des sorties (Tableau 5.8). Pour des questions d'homogénéité des séries, l'enregistrement d'un seul essai est retenu pour traitement de chaque configuration. Le choix est fait en fonction de la meilleure visibilité des poissons. Les paramètres et résultats généraux sont présentés sur le tableau 5.7.

Configuration		C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
Taux de présence 1)	%	32.9	74.3	75.0	82.4	78.5	67.8	67.4	73.7	87.4	57.4	80.6	79.4
Débit dérivé 2)	l/s	0.0	42.7	37.3	48.5	40.2	30.9	23.5	32.8	40.3	34.1	32.9	36.7
Longueur amont 3)	m	-	0.99	1.38	0.60	0.99	0.99	0.99	0.99	0.60	1.17	0.81	0.81
Longueur aval 3)	m	-	0.99	0.60	1.38	0.99	0.99	0.99	0.99	0.60	0.81	1.17	0.81
Essai visualisé		c	c	c	b	a	c	b	a	c	c	c	c
Nombre de poissons	p	20	21	22	11	11	20	20	10	20	19	20	15
Entrées amont	e		19	13	5	4	10	3	5	1	6	2	13
Entrées aval	e		64	38	52	50	39	37	68	54	39	101	84
Entrées totales	e	40	83	51	57	54	49	40	73	55	45	103	97
Taux d'entrées aval	%		77	75	91	93	80	93	93	98	87	98	87
Entrées am/poisson	e/p		0.90	0.59	0.45	0.36	0.50	0.15	0.50	0.05	0.32	0.10	0.87
Entrées av/poisson	e/p		3.05	1.73	4.73	4.55	1.95	1.85	6.80	2.70	2.05	5.05	5.60
Entrées tot/poisson	e/p	1.90	3.95	2.32	5.18	4.91	2.45	2.00	7.30	2.75	2.37	5.15	6.47

Tableau 5.7: Paramètres géométriques des configurations et résultats des essais avec les poissons. 1) Taux de présence des poissons dans le refuge, 2) Débit dérivé dans le refuge, 3) Longueur de la partie de la section interface située en amont/aval de la paroi de dérivation. Les entrées spécifiques sont le rapport du nombre d'entrées au nombre de poissons impliqués dans l'essai visualisé. Les abréviations am et av signifient en amont ou en aval de la paroi de dérivation.

Configuration	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
Distance [m]												
0.00	Angle amont du refuge											
0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.15	2	1	0	3	0	0	2	0	0	2	0	1
0.25	0	3	0	2	1	1	0	0	1	0	0	3
0.35	2	1	1	0	0	2	0	2	0	1	1	4
0.45	2	8	1	0	2	0	0	2	0	1	1	1
0.55	3	3	0	0	0	2	1	1	0	1	0	1
0.65	1	2	1	0	1	2	0	0		0	0	3
0.75	1	0	0	1	0	2	0	0		1	0	0
0.85	0	0	2	0	0	0	0	0		0	0	
0.95	3	1	2	5	0	1	0	0		0	0	
1.05	5	1	5	2	1	0	0	0		0	0	
1.15	3	0	1	2	1	2	1	0		0	0	
1.25	2	0	0	5	4	4	0	2		0	1	5
1.35	0	2	0	7	3	5	3	14		0	4	19
1.45	1	5	6	7	2	6	2	17	4	0	8	12
1.55	1	7	9	6	8	3	6	11	18	3	7	10
1.65	2	14	3	10	15	4	7	9	9	6	18	13
1.75	8	16	7	4	11	8	10	6	10	13	20	17
1.85	3	14	10	3	5	6	6	6	13	14	34	8
1.95	1	5	3	0	0	1	2	3	0	3	9	0
2.00	Angle aval du refuge											

Tableau 5.8: Nombre de passages de poissons entrant dans le refuge, compté dans des intervalles de 10 cm le long de la section constituant l'interface entre le refuge et le canal, pour un essai de chaque configuration. L'origine de la distance est prise à l'angle amont du refuge. Le trait gras indique la position de la paroi de dérivation.

Le cumul des entrées est effectué en distinguant la partie de la section interface située en aval de la paroi de dérivation, de celle située en amont. Le taux d'entrées par l'aval est constitué du rapport entre les entrées cumulées pour la partie aval, et le total des entrées dans le refuge. Il ressort de ce regroupement par configuration (Figure 5.13), que la majorité des poissons entrent dans le refuge par l'aval de la paroi de dérivation. Les valeurs s'étendent entre 75 et 98%, pour un taux moyen de 88% et un écart type de 8%. Une description du cheminement des poissons est donnée au chapitre 5.4.

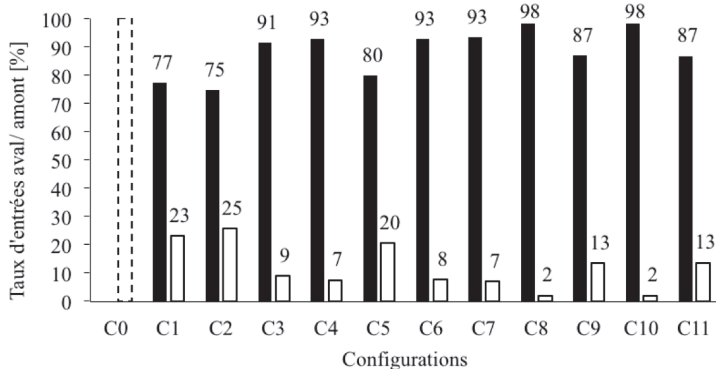


Figure 5.13: Taux d'entrées des poissons dans le refuge par la partie de la section interface située en aval (barrette noire) et en amont (barrette blanche) de la paroi de dérivation.

Dans ce prolongement, une corrélation est recherchée entre le nombre d'entrées par poisson et les taux de présence, relatifs à l'ensemble des configurations. La figure 5.14 montre que le nombre d'entrées par poisson varie entre 2.0 et 7.5. Comme cela est recoupé par les observations lors des essais, les poissons accomplissent plusieurs déplacements en aller-retour entre le canal et le refuge. De plus, le taux de présence maximum n'induit pas le nombre maximum d'entrées. Abstraction faite de la configuration C0, la distribution des points ne montre pas une grande sensibilité du taux de présence en fonction de ce nombre d'entrées. En jetant un regard nuancé entre les entrées par l'amont et par l'aval de la paroi de dérivation, l'insensibilité constatée est confirmée. Ce constat revêt une certaine importance dans la mesure où il permet de dissocier le taux de présence des poissons dans le refuge du nombre d'entrées que ce soit en amont ou en aval de la paroi de dérivation. Autrement dit, il est possible d'analyser des corrélations avec les paramètres géométriques et hydrauliques du refuge et le taux de présence, comme cela sera fait au chapitre 7.2, sans se préoccuper du nombre d'entrées. Ce nombre d'entrées n'est donc pas un indicateur de performance mais plutôt un indice de préférence qui sera exploité au chapitre 7.4.

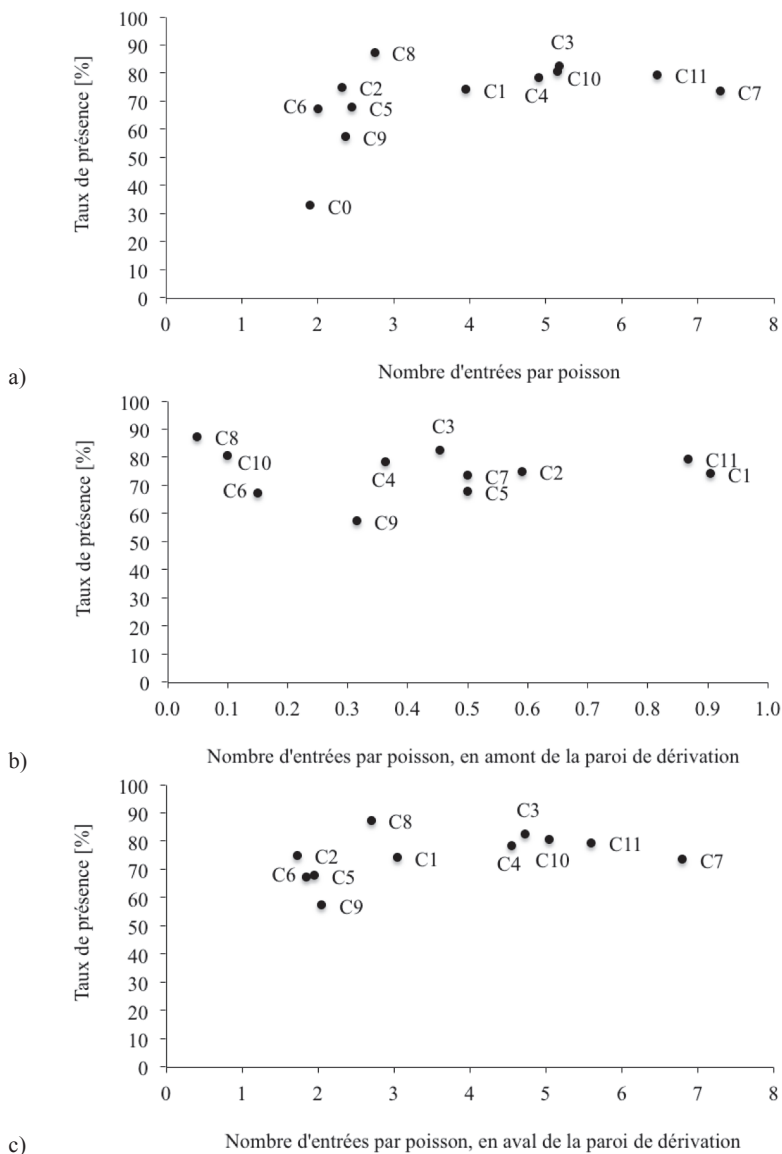


Figure 5.14: Taux de présence des poissons dans le refuge mis en relation avec le nombre d'entrées dans le refuge par poisson impliqué dans l'essai représentatif de chaque configuration. a) total, b) en amont de la paroi de dérivation, c) en aval de la paroi de dérivation.

Une autre corrélation intéressante est recherchée entre le nombre d'entrées par poisson et les débits dérivés, relatifs à l'ensemble des configurations. Sur la figure 5.15 une dépendance entre ces 2 paramètres est observée. Elle pousse à croire que le plus grand débit dérivé induirait 4 à 5 mouvements entrants par poisson.

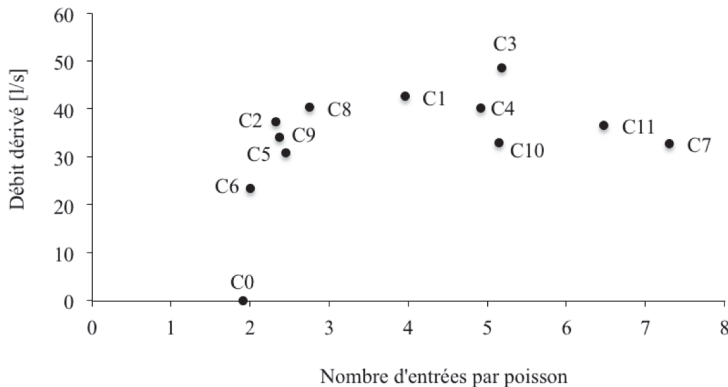


Figure 5.15: Débit dérivé dans le refuge mis en relation avec le nombre d'entrées dans le refuge par poisson impliqué dans l'essai représentatif de chaque configuration.

Les distributions des entrées spécifiques le long de la section interface, relatives aux 12 configurations testées, sont l'objet des figures 5.16 et 5.17. On entend par entrée spécifique, le nombre de passages de poissons entrant dans le refuge, compté dans chaque incrément de 0.10m de la ligne interface, rapporté au nombre de poissons en jeu pour l'essai considéré. Ces résultats détaillés trouveront leur intérêt lors de leur superposition avec la distribution des vitesses d'écoulement dans la même section interface, soit au chapitre 7.3.

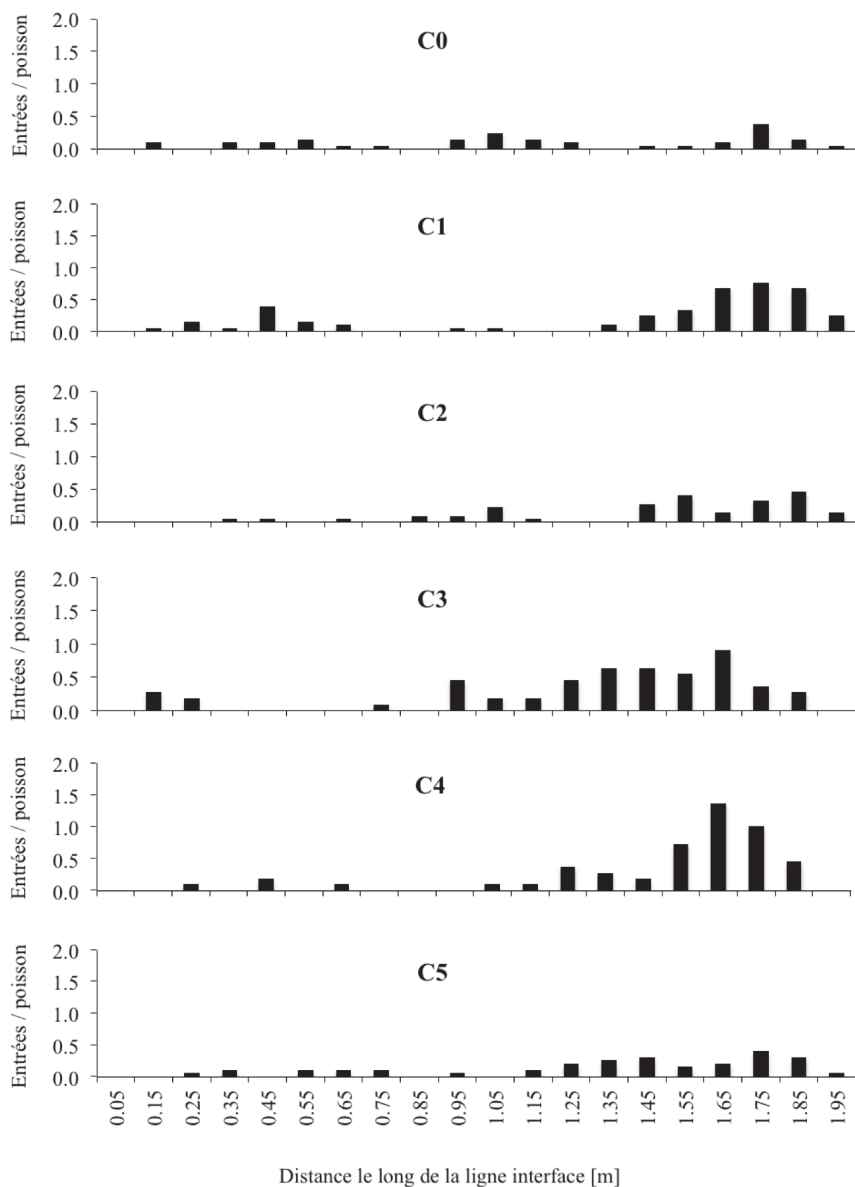


Figure 5.16: Nombres d'entrées dans le refuge rapporté au nombre de poissons en jeu, distribués sur des incréments de 10 cm le long de la section interface. Configurations C0 à C5.

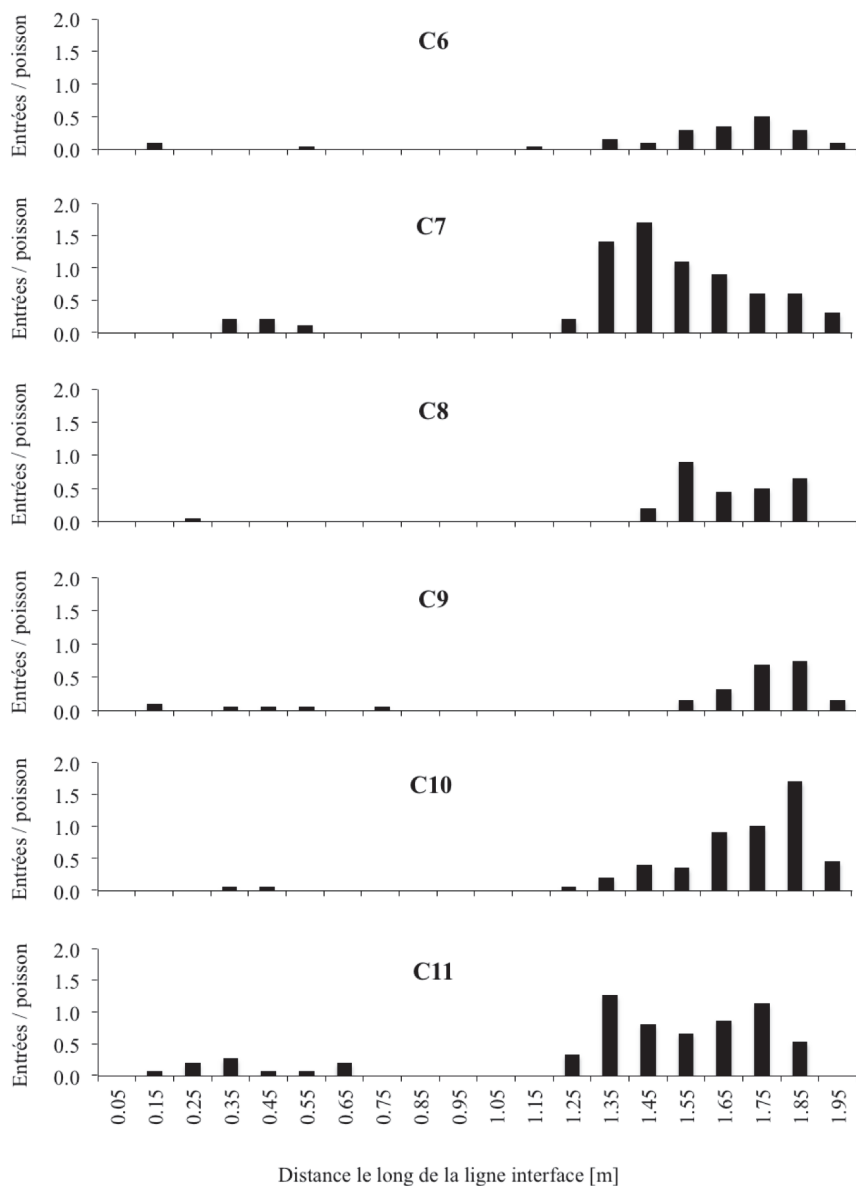


Figure 5.17: Nombres d'entrées dans le refuge rapporté au nombre de poissons en jeu, distribués sur des incréments de 10 cm le long de la section interface. Configurations C6 à C11.

5.4 Observations et informations descriptives

Pour des raisons opérationnelles le traitement numérique des enregistrements vidéo n'a pas été possible. De fait, il a fallu renoncer à l'analyse des trajectoires de poissons. Il n'empêche que la connaissance du cheminement des poissons est indispensable à la compréhension des mécanismes qui les activent. C'est pourquoi une synthèse des observations accumulées au cours des périodes d'essais est transcrite ci-après à titre descriptif.

5.4.1 Cheminements des poissons dans le canal et vers le refuge

Avant chaque essai, les poissons s'immobilisent en nage stationnaire, devant la grille amovible du compartiment d'acclimatation (Figure 5.2). Regardant vers l'amont, ils se répartissent sur la largeur du canal. Une fois cette grille retirée, ils descendent le courant. Ceux qui se trouvent initialement au centre et en rive droite de l'écoulement, soit la plupart, rejoignent la grille aval du canal principal. Les autres, minoritaires, entrent dans le refuge entraînés par le courant dérivé. Les poissons dont le cheminement descendant est interrompu par la grille aval, s'immobilisent en groupe devant elle le long des parois, toujours en nage stationnaire, regardant vers l'amont. Puis ils cherchent à remonter le courant par des tentatives individuelles et anarchiques, avant de montrer des signes d'organisation caractérisés par un déplacement groupé derrière un leader (Figure 5.18).



Figure 5.18: Images successives montrant l'entrée d'un groupe de poissons dans le refuge par l'angle aval, configuration C1.

Les observations ont montré que les poissons accomplissaient plusieurs déplacements en aller-retour entre le canal et le refuge au cours des 3 heures d'essai.

5.4.2 Cheminement préférentiel vers le refuge

Concernant l'entrée par l'aval des poissons dans le refuge durant l'éclusee, les observations et le traitement des images vidéo mettent en évidence un itinéraire préférentiel illustré par l'entremise de la configuration C4 (Figure 5.19).

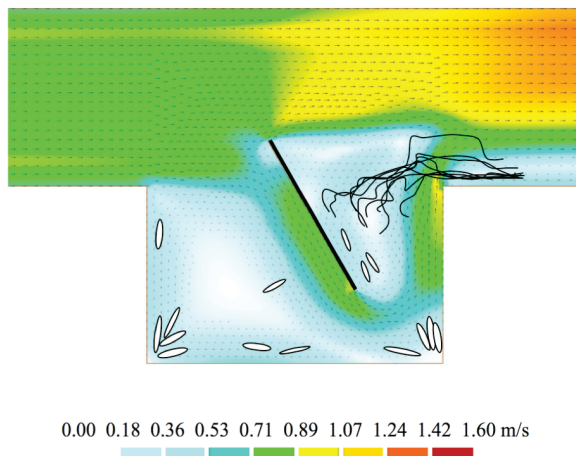


Figure 5.19: Exemple de traitement des enregistrements vidéo pour la configuration C4 : Trajectoires des truites entrant dans le refuge par l'aval, superposé au champ de vitesse simulé avec BASEMENT 2D, et leurs positions dans le refuge (Steffen, 2009).

Partant de la grille aval, les poissons remontent le canal le long de la paroi droite en direction de l'angle aval du refuge. Restant dans ce coin, côté canal, ils s'immobilisent quelques secondes, avant de traverser le courant qui sort du refuge, pour atteindre rapidement la zone située derrière la paroi de dérivation. Ils restent dans cette zone un instant, avant d'entrer franchement dans le refuge. La superposition des trajectoires avec le champ de vitesses d'écoulement simulé par BASEMENT 2D, montre que les poissons remontent le courant en suivant les zones à faibles vitesses d'écoulement le long de la paroi droite du canal. De même, ils rejoignent la cellule de rotation derrière la paroi de dérivation dans le refuge. Pour passer de l'une à l'autre, ils accomplissent un gros effort pour franchir le flux sortant du refuge dans le prolongement de la paroi perpendiculaire au canal. Il est perceptible que les poissons entrent dans le refuge à l'endroit du point de cisaillement (Figure 4.10) du profil de vitesses dans la section interface. Il convient de relever l'importance de la taille de la cellule de rotation située derrière la paroi de dérivation. Par exemple dans le cas de la configuration C2 où elle est confinée sur une bande étroite derrière la paroi, plusieurs poissons sont refoulés du refuge, par le courant de sortie.

5.4.3 Vitesses de nage dans le mouvement des truites entrant dans le refuge

Revenant à la configuration C4, les vitesses d'écoulement ont été mesurées au micromoulinet dans le plan horizontal de parcours préférentiel (Figure 5.20). Les vitesses de déplacement des poissons sont tirées de l'analyse détaillée des images vidéo. En associant ces 2 informations, la vitesse effective de la truite est différenciée de sa vitesse apparente. Il apparaît que la truite profite du courant tant qu'elle se trouve dans la zone de tourbillons en aval de l'angle du refuge, où sa vitesse effective est voisine de la vitesse apparente. Pour pouvoir franchir le flux à hautes vitesses qui sort du refuge, elle doit ensuite nager avec une vitesse de 1.4 m/s environ. Dans le refuge, les 2 valeurs redeviennent faibles, et s'égalisent.

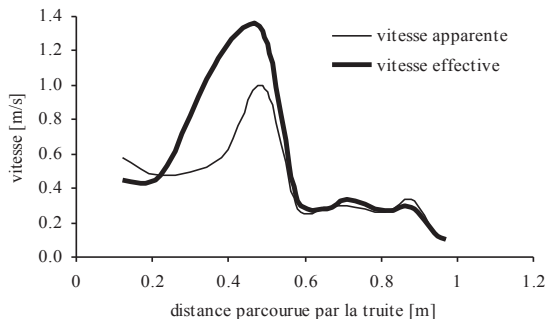


Figure 5.20: Vitesses effective et apparente le long d'une trajectoire de truite entrant dans le refuge (Steffen, 2009). L'origine est dans la zone de décollement située contre la paroi gauche du canal, juste après l'angle de sortie du refuge. Le trait fin indique la vitesse apparente. Le trait gras indique la vitesse effective.

L'observation de l'orientation de la truite au cours de son déplacement a aussi révélé une particularité qui mérite l'attention. En franchissant la zone à forte vitesse, elle semble s'orienter selon la direction des vitesses d'écoulement et non selon sa trajectoire. Recherchant apparemment à minimiser l'intensité de sa force de trainée, elle oriente l'axe de son corps de manière à minimiser son maître-couple.

5.4.4 Profondeur de nage des poissons

La connaissance de la profondeur de nage des poissons revêt une grande importance en vue de la mesure des vitesses d'écoulements correspondantes. En effet, si l'on veut connaître les vitesses du courant que le poisson rencontre sur son cheminement, il faut évidemment les mesurer à la profondeur où il nage. Or, ce paramètre n'a pas pu être mesuré précisément, faute d'un champ de vision horizontal au voisinage du fond. Donc cette profondeur est déterminée

par des observations et interprétations. Toutes les observations faites de visu sur des mouvements entrant dans le refuge par l'aval, ont montré que les poissons se déplacent dans la couche inférieure de l'écoulement. L'épaisseur de cette couche est estimée à moins de 5 cm. Quelques observations faites avec de réglottes verticales graduées en centimètres, poussent à croire que 2.5 cm serait une valeur représentative. Tenant compte des dimensions des poissons en présence, cette valeur correspond à un minimum. En effet, selon nos observations, le rayon vertical du corps d'une truite fario juvénile peut atteindre 1.5 cm. En ajoutant 0.5 à 1 cm pour tenir compte de la nageoire inférieure quand le poisson rase le fond (Figure 5.21). D'autre part, en se référant à la loi de distribution logarithmique des vitesses d'écoulement sur un profil vertical, la vitesse rencontrée à 2.5 cm sur le fond est de 0.6 m/s, dans les conditions d'écoulement du débit de 220 l/s dans le canal de la Maigrauge (Figure 5.21). Or cette vitesse est de l'ordre de la vitesse de croisière du poisson (voir chapitre 2.4.4). Donc, si le poisson veut maintenir sa position en nage stationnaire dans le canal, il ne peut pas se tenir plus haut dans l'épaisseur de l'écoulement.

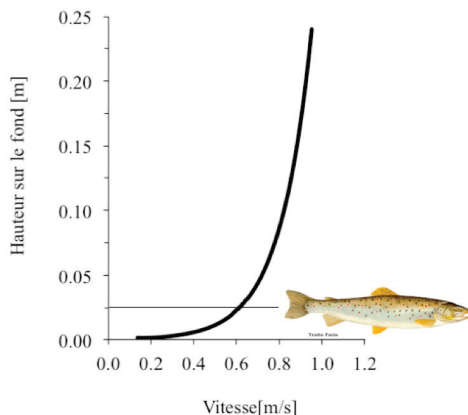


Figure 5.21: Profil de vitesses verticales en écoulement turbulent hydrauliquement rugueux, distribution logarithmique selon la loi $u_z/u^* = [0.25 * \ln(z/h_s)] + 8.5$, avec u_z qui est la vitesse à la profondeur choisie z , u^* est la vitesse de frottement, h_s est la hauteur des aspérités du fond. Le débit est de 220 l/s, la pente longitudinale vaut 0.5 %, la hauteur d'eau est de 0.24m, la hauteur des aspérités est de 0.02m, et la rugosité vaut $50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (voir chapitre 3.2.6).

En résumé, les observations faites au cours des essais conduisent à estimer la profondeur de nage de poissons qui remontent le courant, à 2.5 cm sur le fond. Cette valeur semble être un minimum en regard des dimensions du corps poisson, et un maximum en regard de sa vitesse de croisière. Sur ces appuis, la profondeur de nage des poissons est prise comme étant égale à 2.5 cm sur le fond.

5.5 Conclusions des essais avec les poissons

5.5.1 Conditions d'essais

Au total, une centaine de truites fario ont été capturées en 4 pêches électriques, à l'état sauvage dans le ruisseau du Tannenbach, à Büttisholz, canton de Lucerne (Suisse). Elles ont été sollicitées dans le canal expérimental de la Maigrauge à Fribourg (Suisse) au cours de 4 périodes d'essais réparties dans les intervalles septembre-octobre-novembre 2008, mai-juin 2009 et octobre 2009. La température de l'eau de la Sarine était comprise entre 10 et 14°C. Chaque essai dure 3 heures. Selon les essais 10 à 20 poissons sont soumis à une vitesse moyenne de 0.9 m/s dans le canal, induite par l'écoulement d'un débit de 220 l/s. La position des poissons est repérée chaque 20 minutes. Le mouvement des poissons est filmé en continu durant les 3 heures, dans le secteur du refuge. Chacune des 12 configurations est testée à 3 reprises. Entre les séquences d'essais, les poissons séjournent dans un aquarium et sont nourris avec des macroinvertébrés. A la fin de chaque période d'essais ils étaient ramenés au Tannenbach.

5.5.2 Taux de présence de poissons dans le refuge

Le taux de présence de poissons dans le refuge est calculé pour chaque essai, à partir des 9 relevés des positions détaillées des poissons. Le taux de présence moyen est calculé pour chaque configuration, à partir des résultats des 3 essais effectués pour chacune. Les valeurs sont étalées entre 32 et 87%, avec un taux moyen de 71.4% pour un écart type de 8.7%. L'installation de la paroi de dérivation est déterminante pour obtenir un taux de présence élevé. Le taux de présence moyen augmente avec l'accroissement du débit dérivé dans le refuge. Cette observation est valable dans la limite des valeurs testées, soit quand le débit dérivé est inférieur à 22% du débit total dans le canal (Tableau 4.1).

5.5.3 Entrées des poissons dans le refuge

Les passages de poissons entrant dans le refuge sont comptés sur les enregistrements vidéo, au droit de la section interface. De manière dominante, ils entrent par la partie de la section interface située en aval de la paroi de dérivation. Les valeurs du taux d'entrées par l'aval s'étalent entre 75 et 98% autour d'une moyenne de 88% et avec un écart type de 8%. Le débit dérivé influence légèrement le nombre d'entrées de poissons dans le refuge. Par contre ce nombre d'entrées n'influence apparemment pas le taux de présence de poissons dans le refuge. Ce constat est inchangé si l'on distingue les entrées en amont et en aval de la paroi de dérivation.

6 MESURES DES VITESSES D'ÉCOULEMENT

6.1 Paramètres et dimensions

6.1.1 Rappel des objectifs et conditions

Le refuge latéral aménagé dans les berges est sensé offrir une zone de repos aux poissons soumis aux fortes vitesses imposées par les éclusées. Le but de cette recherche est avant tout, de produire des conditions hydrauliques qui signalent au poisson la présence du refuge et lui permettent d'y pénétrer. L'objectif scientifique est de comprendre ce qui influence le comportement du poisson afin de pouvoir optimiser les configurations élaborées et d'en maximiser l'attractivité. Parmi les 3 paramètres classiques de modélisation des habitats que sont la hauteur d'eau, la vitesse d'écoulement et la granulométrie du substrat, la vitesse est certainement l'élément le plus influent et sensible du dispositif examiné. C'est pourquoi le canal expérimental de la Maigrauge est aménagé de sorte que seule la vitesse varie dans le domaine favorable-défavorable de préférence d'habitat (Vismara & al, 2001). En effet, les hauteurs d'eau sont comprises dans la gamme des meilleures préférences alors que le substrat est colmaté afin qu'il ne permette pas aux poissons de s'insérer dans les vides. Ainsi, le refuge est le seul élément de sécurisation disponible dans le contexte expérimental. La vitesse d'écoulement de fait le paramètre qui décrit en 1^{er} ordre les conditions hydrauliques locales. En 2^{ème} ordre lui est associée la contrainte de cisaillement. Ces quelques rappels mettent en évidence l'importance de ce paramètre.

6.1.2 Pourquoi mesurer les vitesses en canal au lieu de les simuler ?

La question des moyens par lesquels obtenir les données vélocimétriques met en concurrence la modélisation numérique et la mesure expérimentale, à laquelle est liée le nombre de dimensions à considérer, 2D ou 3D. Dans le cas présent, la connaissance des vitesses est requise à la profondeur où nagent les poissons, soit à 0.025m du fond, là où le gradient vertical de vitesses est important. C'est pourquoi, il est nécessaire de connaître la distribution verticale des vitesses. Donc s'il s'agissait de procéder par simulation, il faudrait recourir à un modèle 3D. Mais la simulation n'a pas été retenue comme moyen de production de données de vitesses. Il lui a été préféré des mesures de vitesses sur le canal de la Maigrauge. Dès le moment que ce canal existe pour effectuer les essais avec les poissons, il est judicieux de mesurer les vitesses d'écoulement directement sur les sections franchies par les poissons. D'ailleurs ces données pourront servir par la suite de référence pour le calage d'un modèle numérique utile lors de la réalisation de refuges en rivières.

6.2 Techniques de mesures des vitesses

6.2.1 Inventaire des techniques envisagées

Concernant le choix de la technique de mesure, il résulte du compromis entre le respect des objectifs susmentionnés, de la disponibilité des instruments et de la précision des résultats. Trois techniques différentes ont été comparées, à savoir le micro-moulinet hydrométrique, la LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) et l'UVP (Ultrasonic Doppler Velocity Profiler). Par principe, les mesures de vitesses au micromoulinet constituent la référence de comparaison et de validation avec les autres méthodes de mesure. Il a déjà été question de mesures au micro-moulinet au chapitre 4, pour des comparaisons avec les vitesses simulées par Basement 2D. En l'occurrence, les mesures au micromoulinet ont été utilisées dans la phase d'initialisation et réglage des paramètres d'ajustement de l'équipement UVP. Afin d'exploiter les mesures dans les situations où elles donnent la meilleure précision, la section de comparaison a été prise dans le canal, en amont du refuge, là où l'écoulement permanent est unidirectionnel. Toutefois, il n'était pas envisagé de procéder systématiquement à la saisie des vitesses au micromoulinet. En effet la technique UVP est largement préférable, à cause de la rapidité de saisie de profils de vitesse, permettant de couvrir instantanément toute une section à jauger. De plus elle n'est pas intrusive et la direction du vecteur-vitesse mesuré est clairement établie, contrairement au micromoulinet.

6.2.2 Pourquoi la LSPIV ne convient pas?

Le principe de base de la vélocimétrie par images de particules (PIV) consiste à identifier le déplacement de particules placées dans un écoulement, sur 2 images successives séparées d'un intervalle de temps très court (Riethmuller, 2005). Un plan de l'écoulement est isolé par un éclairage laser sur une surface d'environ 0.2 par 0.2m. Une caméra installée perpendiculairement au champ lumineux, filme le mouvement des particules éclairées et entraînées par le courant.

La LSPIV (Fujita & al, 1998) est une extension de la technique PIV, développée pour mesurer les vitesses qui animent la surface libre d'un écoulement. Elle fonctionne avec un éclairage halogène courant, c'est à dire sans balayage laser, ce qui permet de couvrir de plus grandes surfaces. La surface libre estensemencée de particules flottantes de diamètre calibré (1 à 3mm) et la masse volumique voisine de celle de l'eau. Le déplacement des particules est filmé par une caméra numérique installée verticalement au-dessus de la surface libre. Par le traitement des images, le réseau des lignes de courant et le champ de vitesses peuvent être reconstitués. L'une des difficultés réside dans l'éclairage qui doit à la fois donner une bonne visibilité des particules et minimiser les reflets sur l'eau, pour l'obtention d'images de qualité.

Le Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'EPFL a appliqué cette technique avec succès dans plusieurs projets (Kantoush & al, 2008).

Dans le cadre de cette recherche, l'intérêt de la vélocimétrie par images de particules, réside dans le fait que la méthode est non intrusive, et qu'elle permet d'obtenir des champs de vitesses. Toutefois la technique PIV de base s'avère peu adaptée aux dimensions du canal et des conditions hydrauliques à documenter. Les plans horizontaux sont beaucoup plus grands que la couverture du champ laser. De ce fait, il serait nécessaire de procéder par quadrillage. Cela demande de déplacer le projecteur et surtout de l'immerger dans l'écoulement ce qui est une source de perturbations. L'application deviendrait valable sur un canal de dimensions réduites de 1 à 5. Avec cette échelle tout de même respectable, 1m devient 0.2m ce qui correspond aux dimensions couvertes par le faisceau laser, et implicitement les vitesses sont réduites. Mais de toute façon les champs verticaux ne peuvent pas être décrits par PIV car ils sont franchis frontalement par les particules qui se déplacent en moyenne horizontalement. Quant à la technique LSPIV, elle couvre toute la surface du refuge et de ses alentours, mais elle ne renseigne que sur les conditions en surface libre. De plus, pour saisir des vitesses qui peuvent atteindre 1m/s, la fréquence d'acquisition des images doit être très élevée. Les caméras du marché ne peuvent pas y répondre et la capacité de stockage des ordinateurs standard est insuffisante. Quoi qu'il en soit, le renoncement résulte aussi de l'existence d'une solution adaptée à savoir la technique UVP, décrite ci-après.

6.3 Profileur de Vitesses par Ultrasons (UVP)

6.3.1 Description de la technologie UVP

La technologie UVP est un raffinement de la technique de mesures de la vitesse par ultrasons, au sens du traitement du signal. Le transducteur à ultrasons a la forme d'un petit cylindre qui émet par sa tête immergée et dans le prolongement de son axe, un faisceau d'ultrasons à haute fréquence qui se propagent dans l'eau à la vitesse de 1480 m/s. L'analyse des échos renvoyés par les particules en suspension dans l'écoulement, permet de mesurer la vitesse axiale tout au long du faisceau à différentes distances de la tête du transducteur (Figure 6.1). La position du vecteur sur la ligne de mesure est calculée en fonction du temps de parcours de l'onde. L'intensité de la vitesse axiale est donnée par le décalage de fréquence entre celle émise et celle restituée selon le principe de l'effet Doppler. De cette manière, un profil de vitesses peut être constitué dans le plan vertical qui contient l'axe de la sonde, par simple rabattement trigonométrique. Le transducteur est positionné de manière inclinée par rapport à l'axe principal de l'écoulement et le rabattement selon le sinus de l'angle d'inclinaison verticale permet d'obtenir le profil vertical des vitesses. Le choix de la fréquence d'émission dépend de la gamme de vitesses à couvrir et de la longueur du faisceau nécessaire.

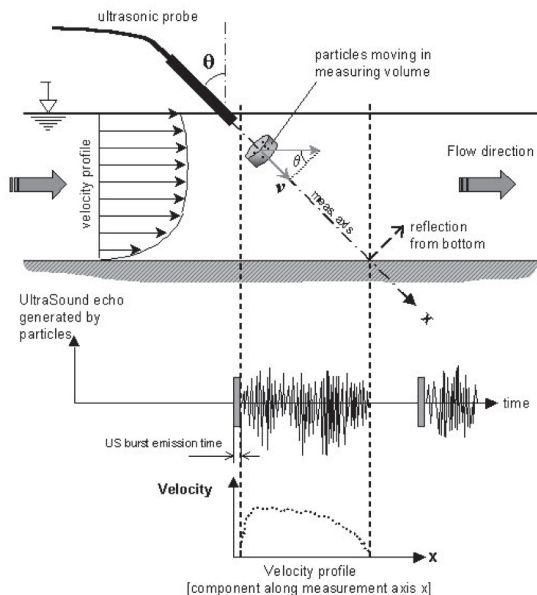


Figure 6.1: Représentation schématique du principe de mesure UVP, dans un écoulement à surface libre (tiré du manuel Met-Flow, 2002).

Les références technologiques et scientifiques concernant la technique UVP sont abondantes (Met-Flow, 2002). Le Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'EPFL a appliqué cette technique avec succès, dans plusieurs projets (Nilipour & al, 2004 ; Rosier & al, 2004 ; Kantoush & al, 2006, 2008 ; De Cesare & al, 2006).

6.3.2 Equipement et conditions de mesure UVP

En l'occurrence, les profils de vitesses ont été mesurés avec un équipement UVP-DUO, Met-Flow SA (Figure 6.2a). Afin de mesurer des vitesses qui atteignent $\pm 1\text{m/s}$ sur la hauteur d'eau de 0.25m, les transducteurs choisis ont une fréquence de 1 MHz (Figure 6.2 b). Les sondes ont un diamètre de 16mm pour une longueur de 40mm. Le profil est constitué de 50 points distribués de manière équidistante sur la ligne de mesure. Les 50 valeurs de vitesse correspondantes sont en fait la moyenne de 128 mesures successives. Les paramètres statistiques de turbulence, tels que la racine carrée de la valeur quadratique moyenne des fluctuations (RMS) et la variance, sont également calculés en chaque point. Les transducteurs sont supportés par des plaques en PVC perforées avec un angle d'inclinaison de 20° (Figure 6.2 c), construites pour la circonstance. Ils sont partiellement immergés à la surface libre de

l'écoulement (Figure 6.3). Le rabattement des vecteurs sur l'horizontale donne alors le profil de vitesses dans un plan vertical. Mais en réalité l'origine des vecteurs reste attachée à la ligne de mesures. L'erreur induite par le calcul de rabattement est minimisée par le petit angle d'inclinaison du transducteur. De plus, le transducteur est positionné de manière à ce que le faisceau émis coïncide avec l'axe vertical de rabattement à la profondeur approximative où nagent les poissons, soit à 2.5 cm du fond.

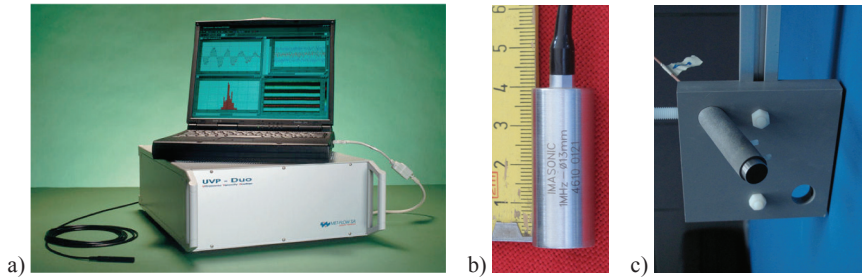


Figure 6.2: Mesures de vitesses par UVP, a) Equipement UVP-DUO, b) transducteur 1 MHz, c) support de transducteurs.

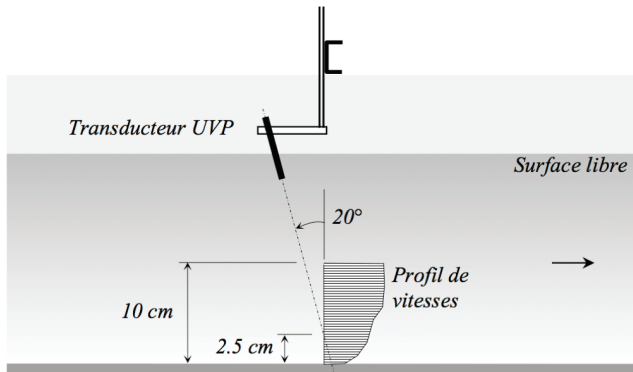


Figure 6.3: Positionnement d'un transducteur UVP dans un plan vertical. Pour des questions de lisibilité, les dimensions ne sont pas à l'échelle.

6.3.3 Disposition des transducteurs dans les sections de référence

Compte tenu des buts de cette recherche, les sections de référence pour la mesure des vitesses d'écoulement sont bien entendu les mêmes que celles retenues pour le comptage des passages de poissons. Il s'agit principalement de la section interface entre le canal et le refuge (Figure

6.4), qui est subdivisée en 2 parties. D’une part celle qui est située en amont de la paroi de dérivation et qui permet l’entrée de l’écoulement dans le refuge, et d’autre part la section de sortie située en aval de la paroi.

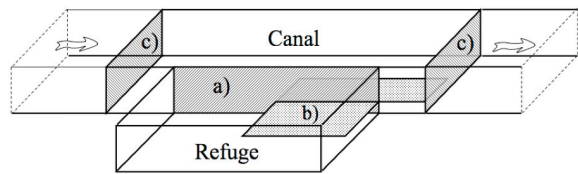


Figure 6.4: Plans de mesure des vitesses d’écoulement, a) Section à l’interface entre le canal et le refuge, b) Sections du canal, en amont-aval du refuge, c) Plan horizontal délimité couvrant la zone de cheminement préférentielle des poissons.

Dans le canal, une section située 2m en amont du refuge est considérée afin de vérifier la distribution homogène du flux sur toute la largeur du canal. Du fait qu’un écoulement rectiligne uniforme est sensé y régner, elle est également utilisée pour l’étalonnage et la comparaison avec les mesures au micro-moulinet. Les vitesses dans le canal sont aussi mesurées dans une section située 0.75m en aval de l’angle de sortie du refuge dans le but de définir la zone d’influence de ce dernier. Enfin, un champ horizontal est reconstitué dans la zone de cheminement préférentiel des poissons entrant dans le refuge par l’aval.

Disposant de 6 transducteurs, chaque section de référence est couverte simultanément selon la distribution présentée dans le tableau 6.1 et la figure 6.5. Les sondes sont réparties de manière symétrique le long des sections du canal, elles sont d’avantage resserrées dans les parties de la section interface où les vitesses sont les plus élevées.

Transducteur		1	2	3	4	5	6	
Paroi	gauche							droite
Sections a)	Solde	18.75	18.75	12.50	12.50	12.50	4.00	[cm]
Sections b)		12.50	16.50	16.50	29.00	16.50	12.50	[cm]

Tableau 6.1: Distances entre les transducteurs dans les sections de mesures.

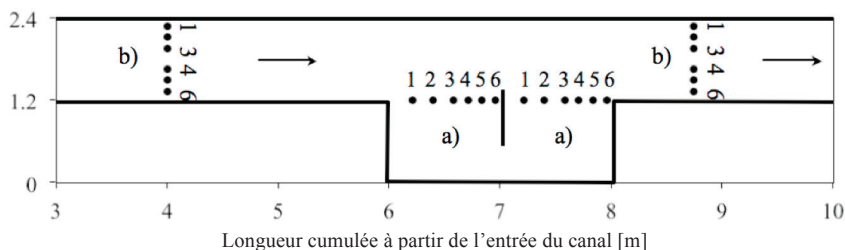


Figure 6.5: Disposition des 6 transducteurs dans les sections de mesures, a) sections sur l'interface du refuge, b) sections dans le canal.

6.4 Résultats des mesures UVP

6.4.1 Distribution des vitesses dans la section du canal en amont du refuge

L'un des éléments de validation des conditions hydrauliques du dispositif expérimental concerne la distribution des vitesses sur la largeur du canal à l'approche du refuge. En effet, il est important que les débits dérivés dans le refuge ne soient pas influencés par une distribution asymétrique des vitesses d'approche. Une telle situation indésirable pourrait s'établir par exemple en relation avec un encrassement local de la grille d'entrée par des feuilles (Figure 6.6b). Il se pourrait aussi tout simplement que la courbe de remous du tronçon d'alimentation du canal provoque une répartition non uniforme de l'écoulement sur la largeur du canal d'essais. Pour écarter ces doutes des profils UVP ont été levés dans une section droite du canal située 2m en amont du refuge, dans la configuration C1 de la paroi de dérivation, perpendiculaire à l'axe du canal. Ces mesures ont aussi permis de comparer les mesures UVP avec les valeurs mesurées au micromoulinet dans des conditions hydrauliques stables.

Les 6 transducteurs ont été disposés selon la figure 6.5, pour accomplir 4 séries de mesures successives. Les résultats bruts sont des profils verticaux qui ont une allure ventrue à peu près classique. Pour calculer la vitesse moyenne sur la hauteur d'eau qui fait 0.24m, un complément est apporté à chaque profil pour compenser le déficit de données sur la hauteur d'immersion du transducteur et sur la partie impropre du signal à sa naissance, ce qui représente au total 5 à 6 cm. Sur cette tranche, le profil est admis comme rectangulaire, dans le prolongement du profil mesuré. Les profils respectifs présentés en figure 6.6, sont constitués de la série des valeurs moyennées sur la hauteur d'eau. Quant au profil moyen, il résulte de la moyenne des 4 vitesses moyennes aux emplacements des transducteurs. Si son allure va au devant des attentes (Figure 6.6a), une légère dissymétrie est perceptible entre les moitiés gauche et droite.

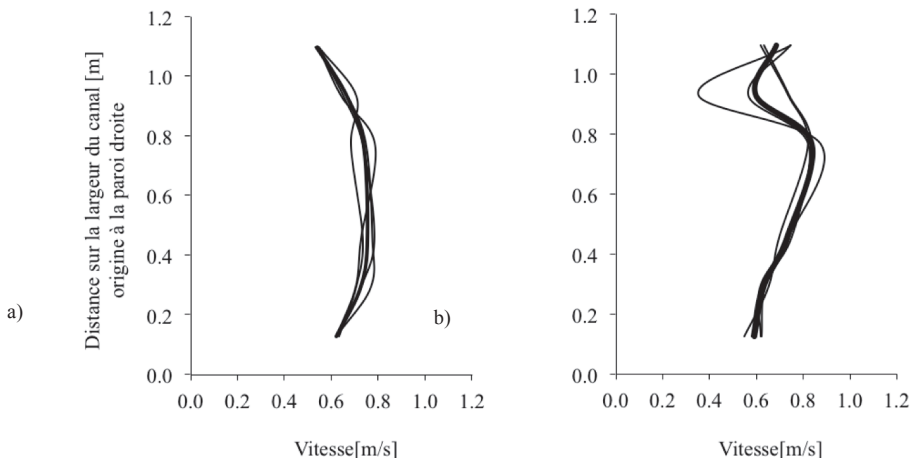


Figure 6.6: Vitesses moyennes UVP, distribuées sur la largeur du canal, à 2 m en amont du refuge, dans la configuration C1. Les traits fins correspondent aux 4 essais effectués et le trait gras donne les valeurs moyennes des 4 essais. a) grille d'entrée nettoyée fréquemment, b) grille d'entrée encrassée par des feuilles.

Afin de quantifier cette différence, des paires de vitesses moyennes gauche-droite ont été constituées. Elles correspondent entre elles par leur appartenance à un profil situé à égale distance de part et d'autre de l'axe longitudinal du canal. Elles sont représentées sur la figure 6.7. En forçant son passage par l'origine, la droite de régression qui en résulte est caractérisée par une pente proche de 1.0. La valeur du coefficient de corrélation est de 0.72, confirmant la dissymétrie apparente. Les vitesses correspondantes sont en moyenne plus élevées dans la moitié droite qu'à gauche. En termes de débit, l'intégration géométrique du bulbe de vitesses, donne bien les 200 l/s qui s'écoulaient durant ces essais préliminaires. La répartition droite-gauche est de 56% - 44%. Des explications ont été recherchées sans réponse convaincante: la dissymétrie de l'alimentation du canal, le développement en amont de la courbe de remous imposée par la présence de la paroi de dérivation, l'oscillation transversale du plan d'eau. Bien que significative, cette répartition non uniforme du débit est considérée comme acceptable, dans le contexte de l'aléa expérimental.

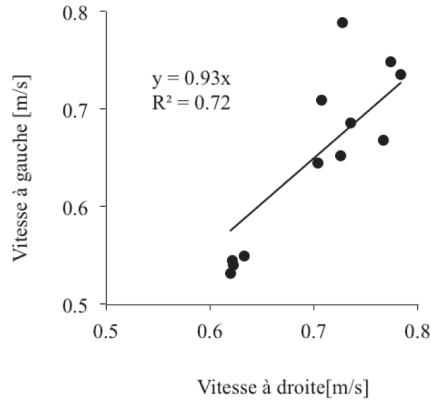


Figure 6.7: Moyennes des vitesses mesurées à droite de l'axe longitudinal du canal, mises en relation avec leurs correspondantes de gauche, positionnées à égale distance transversale de l'axe, configuration C1.

6.4.2 Profils de vitesses dans la section d'interface

La section à l'interface du canal et du refuge est coupée en 2 parties par la présence de la paroi qui force la circulation de l'eau dans le refuge. Les 6 transducteurs à disposition ont été successivement installés le long de chaque partie de la ligne interface. Afin de donner une bonne description des flux, ils sont davantage resserrés là où les vitesses sont élevées (Figure 6.5). Les transducteurs sont positionnés de sorte que le plan vertical auquel appartient leur axe de mesure soit perpendiculaire à la section interface. Leur tête regarde dans le sens du courant dominant, à savoir vers le refuge en amont de la paroi de dérivation, vers le canal en aval. Ainsi, les profils ne montrent que les composantes de vitesses dans le même sens. Le choix de s'en tenir à des profils 1D a été traité au chapitre 4.4.1. Dans le plan vertical, le profil doit surtout couvrir une hauteur d'eau en relation avec profondeur de nage des poissons. Cette dernière ayant été fixée à 0.025m, 4 profils horizontaux ont été constitués à partir des relevés UVP, aux distances de 0.025m, 0.050m, 0.075m, 0.100m du fond.

6.4.3 Comparaisons de résultats dans la section interface

Dans un premier temps, l'intérêt s'est porté sur la comparaison des résultats UVP avec ceux obtenus par simulation numérique de BASEMENT 2D, ainsi qu'avec les mesures au micromoulinet. Reprenant la procédure suivie au chapitre 4.5.2, la comparaison est tout d'abord établie pour la configuration C1. Dans ce but, un profil horizontal de vitesses UVP moyennées sur la hauteur d'eau a été constitué. Les transducteurs ne couvrant pas toute la

hauteur d'eau, une reconstitution du profil vertical des vitesses est opérée dans sa partie supérieure en admettant, comme précédemment, que la vitesse est constante sur une tranche de 5 à 6 cm sous la surface libre. Si la comparaison entre les vitesses simulées et mesurées au micromoulinet, présentée au chapitre 4.5.2, permettait de conclure à des différences modérées, la ligne UVP s'écarte ici notablement des autres (Figure 6.8).

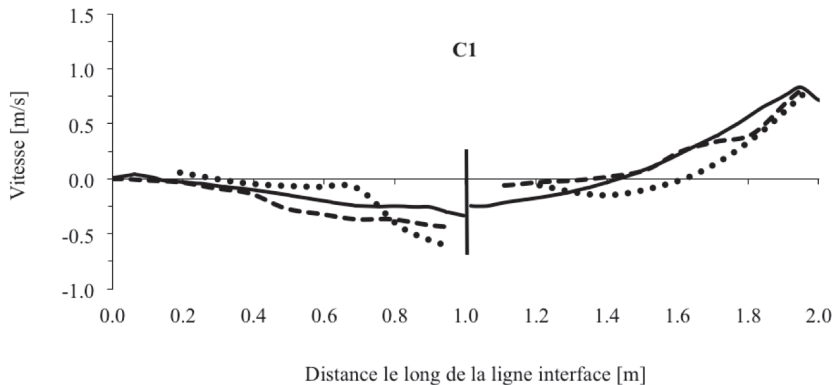


Figure 6.8: *Distribution des composantes normales de vitesses moyennées sur la hauteur d'eau, le long de la ligne à l'interface entre le refuge et le canal, simulation Basement 2D en trait plein ; moyenne des mesures au micromoulinet en traitillé ; moyenne des mesures UVP en pointillé.*

6.4.4 Explication des écarts constatés

Les écarts observés peuvent s'expliquer par différentes particularités. A la réflexion, 3 d'entre elles focalisent l'attention. La première s'appuie sur le fait que les mesures UVP et celles effectuées au micromoulinet ne se déroulent pas exactement dans le même plan. En effet, les axes de mesures UVP sont inclinés à 20° et coupent la section interface à 0.025m du fond (Figure 6.3), alors que les vitesses au moulinet sont prises dans la section interface. Aussi bien les champs de vitesses BASEMENT, que l'observation de l'écoulement lors des essais, complétés par quelques mesures ponctuelles, montrent que la vitesse varie très sensiblement de part et d'autre de la ligne interface, du moins dans la partie située en amont de la paroi de dérivation. De ce fait, le positionnement des transducteurs peut influencer les résultats dans l'ordre de grandeur des écarts constatés.

La seconde particularité, déjà relevée au chapitre 4.5.1, naît dans l'impossibilité à donner une direction stable de la vitesse dans les zones à fortes fluctuations. Pour remédier à cet inconvénient, les valeurs de vitesses tirées des mesures au moulinet sont des moyennes de 3

mesures successives prises dans 3 directions différentes. Il s'agit donc d'un résultat pondéré conditionné par l'incertitude régnant sur la direction du vecteur-vitesse. En comparaison, les mesures UVP donnent directement les composantes normales de vitesses, sur tout un profil relevé simultanément sur la profondeur d'eau auscultée. De plus elles intègrent les fluctuations par un grand nombre de mesures sur un intervalle de temps très court.

La 3^{ème} particularité réside dans la technique de saisie de vitesses. Le micromoulinet avec son hélice confinée dans un petit cylindre peut produire une perturbation de l'écoulement malgré sa petite taille, spécialement à proximité des parois. Or pour mesurer les vitesses extrêmes, il a fallu approcher très près des parois de dérivation et de sortie du refuge. A comparer, la technique UVP, non-intrusive, ne souffre pas de cet inconvénient.

Du point de vue du débit dérivé, le traitement des mesures UVP donne une valeur moyenne entrée/sortie de 40.7 l/s, légèrement inférieure aux 42.7 l/s obtenus à partir des simulations BASEMENT (Tableau 4.1). L'écart relatif de 5%, montre que globalement les débits dérivés sont du même ordre de grandeur, ce qui est rassurant. Il s'agit donc principalement d'une distribution différente des vitesses le long de la ligne interface, entre les simulations Basement 2D, et les mesures UVP.

6.4.5 Comparaison à la distance de 0.065m du fond

Dans le cas présent, il est jugé préférable de poursuivre la comparaison en se détachant des simulations numériques, pour confronter les valeurs mesurées à une profondeur comparable soit à proximité de l'intersection située à 0.025m sur le fond. En réalité, le niveau le plus profond ausculté au moulinet se trouve à 0.065m du fond. La figure 6.9 montre les 2 profils à cette profondeur, pour la configuration C1. Bien que différentes en terme d'amplitude, les distributions ne diffèrent pas de celles de la figure précédente. Les courbes UVP sont plus sinueuses avec des valeurs extrêmes plus marquées.

Le coefficient de corrélation issu de la régression linéaire entre les paires de valeurs de vitesses prises au même endroit le long de la ligne interface, n'est par conséquent pas très élevé (Figure 6.10). Toutefois, même si les points sont dispersés, ils se rassemblent tout de même, le long de la droite, dont la pente correspond à un angle de 41° au lieu des 45° souhaités. L'ordonnée à l'origine de - 0.05 m/s n'est également pas très importante.

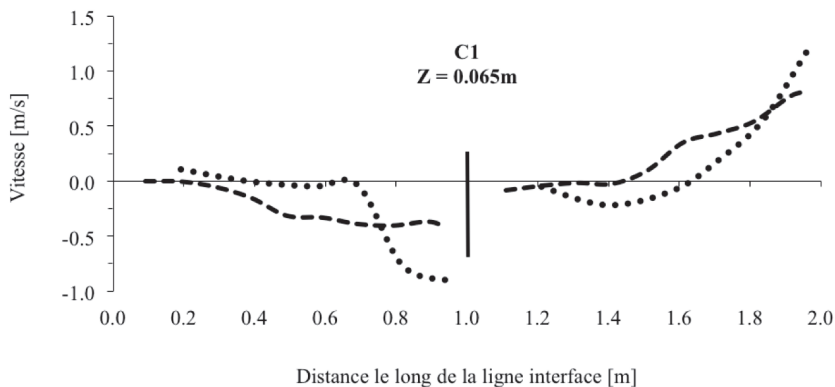


Figure 6.9: Profils horizontaux des vitesses normales à $z = 0.065\text{m}$ du fond, le long de la ligne d'interface entre le refuge et le canal, pour la configuration C1. Mesures au micromoulinet en traitillé ; mesures UVP en pointillé.

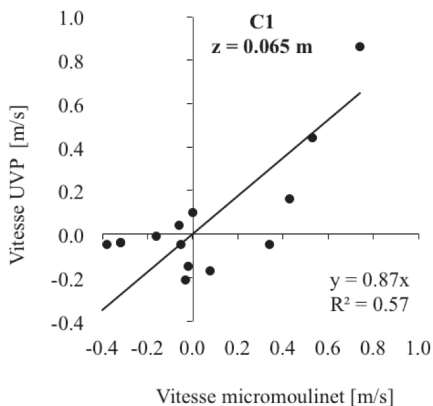


Figure 6.10: Vitesses mesurées au micro-moulinet en comparaison de celles mesurées par UVP à $z = 0.065\text{m}$ du fond le long de la ligne interface, configuration C1.

6.4.6 Conclusion des comparaisons

S'agissant d'expliquer les écarts observés entre les vitesses normales mesurées au moulinet ou par UVP dans la section interface, l'analyse conduit forcément à la désignation d'une technique de référence, soit celle qui offre à la fois la précision et la finesse requises par la situation. Si le moulinet se révèle précis pour l'auscultation d'écoulements rectilignes stables, cet avantage disparaît quand l'axe de son hélice ne peut être parfaitement positionné dans la

direction du vecteur-vitesse dont on veut saisir l'intensité. En l'occurrence, les comparaisons présentées précédemment mettent en évidence le fait qu'il n'est pas adapté pour mesurer les vitesses effectives le long de la section interface. De son côté, la technologie UVP permet de contourner ces handicaps par un signal ultrasons sensible et non-intrusif. C'est ce qui justifie la confiance qui lui est accordée pour la suite de l'analyse.

6.4.7 Analyse de la distribution des vitesses UVP dans la section interface

Reprenant la configuration C1 comme référence, l'analyse de la distribution des vitesses dans la section interface est poursuivie en ne considérant que les mesures UVP. Comme précisé précédemment, la hauteur d'eau examinée est limitée à la tranche de 0.10m au-dessus du fond, couvrant le domaine de nage des poissons. Les vitesses sont transcrites de manière classique, par 4 profils horizontaux (Figure 6.11) et 12 profils verticaux (Figure 6.14). De plus, la valeur quadratique moyenne des fluctuations de vitesses (RMS) est produite pour les 4 profils horizontaux (Figure 6.12) et les RMS sont exprimées en fonction des valeurs respectives de vitesses (Figure 6.13).

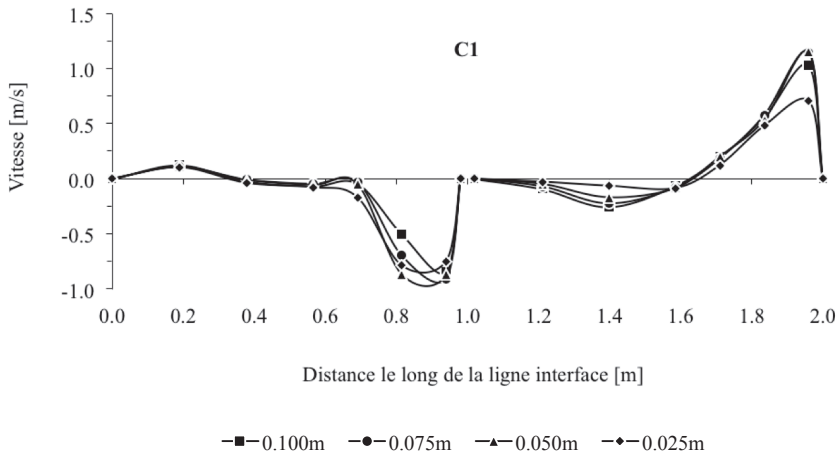


Figure 6.11: Distribution horizontale des vitesses le long de la section interface, à 4 niveaux sur le fond, configuration C1.

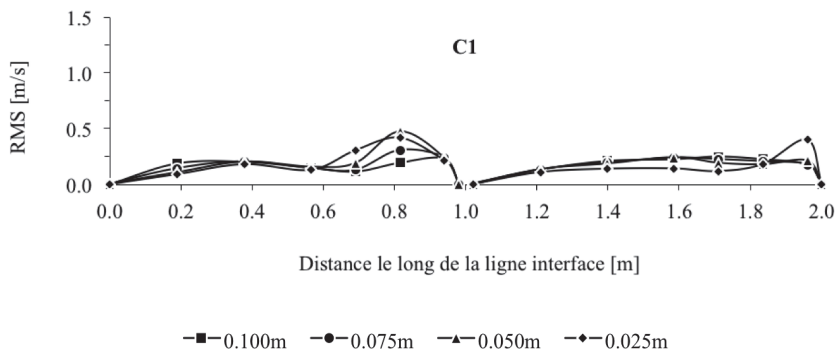


Figure 6.12: Distribution horizontale des valeurs RMS de vitesses le long de la section interface, à 4 niveaux sur le fond, configuration C1.

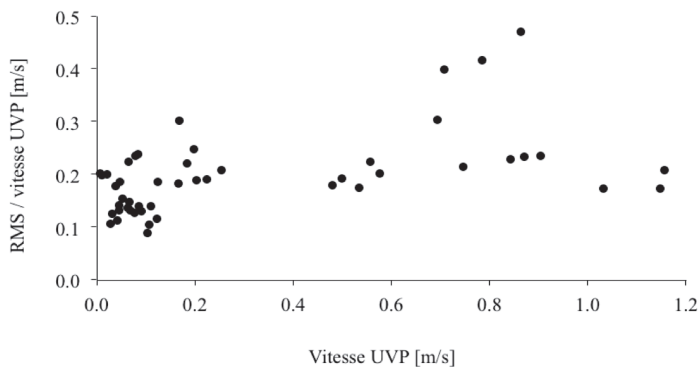


Figure 6.13: Valeurs RMS en rapport des valeurs respectives de vitesses, configuration C1.

Concernant la variation spatiale des vitesses dans la section interface, les profils horizontaux sont semblables sur les 4 niveaux choisis, aussi bien en répartition qu'en intensité. Seules les plus fortes valeurs montrent une réduction de haut en bas, mais relativement limitée. Les profils verticaux montrent une activité importante presque jusqu'au fond du canal (Figure 6.14). Dans l'ensemble leur allure ne surprend pas. La seule singularité apparaît au pied du profil 1.96m, sous l'effet du biais à 45° aménagé pour adoucir la liaison entre la paroi verticale et le fond du canal, respectivement du refuge (Figure 3.6b).

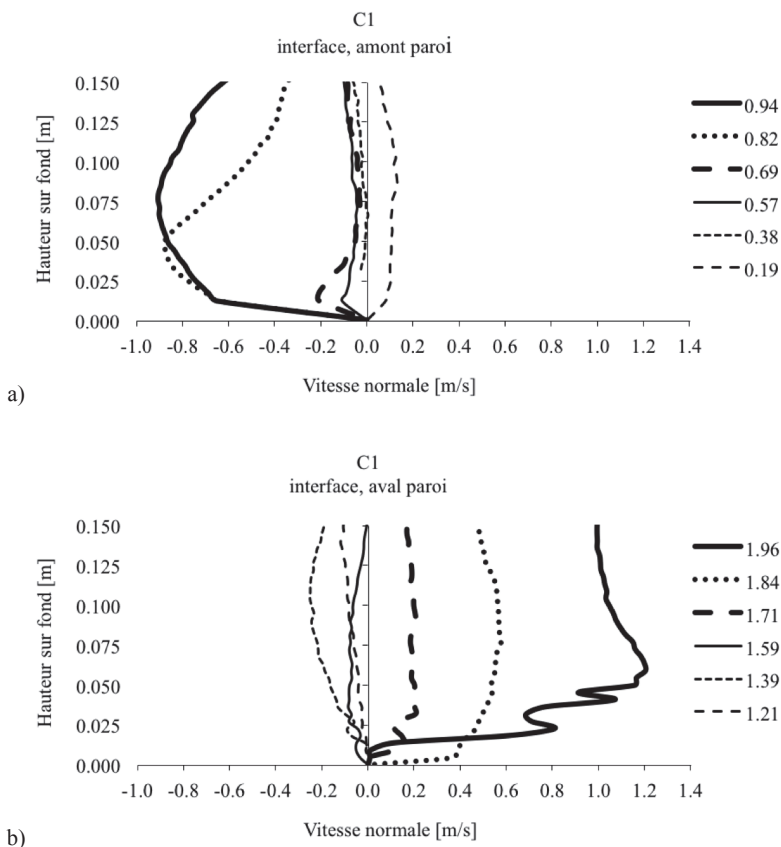


Figure 6.14: Profils verticaux des vitesses normales, le long de la section interface, pour la configuration C1. a) en amont de la paroi de dérivation, b) en aval de la paroi de dérivation, configuration C1. L'étiquette de chaque profil correspond à son positionnement en abscisse le long de la ligne interface. L'origine est à l'angle amont du refuge.

6.4.8 Profils de vitesses de chaque configuration

En référence à la figure 6.15, pour la distinction des configurations, les figures 6.16 à 6.18 montrent la superposition des 4 profils de vitesses relatifs aux profondeurs susmentionnées, pour toutes les configurations testées. Manquent les configurations C0 et C6, toutes deux écartées de l'analyse du fait qu'elles ne sont pas comparables avec les 10 autres, qui elles, répondent toutes à la même emprise de la paroi de dérivation dans l'écoulement. Au premier

regard, l'allure des profils de vitesses paraît très diversifiée. Outre le débit dérivé dont les effets seront examinés au chapitre 7, la forme des profils peut être influencée par la position de la paroi de dérivation, qui définit la proportion entre les 2 parties de la section interface, mais aussi par son angle d'orientation. De manière générale, la vitesse est maximale le long de la paroi de dérivation pour l'écoulement entrant dans le refuge et le long de la paroi aval qui guide l'écoulement sortant. C'est évidemment à ces endroits que les différences sont les plus marquées sur la profondeur. Des ressemblances de distribution sont recherchées en examinant de visu les figures 6.16 à 6.18. Elles sont principalement induites par la position de l'intersection de la paroi de dérivation et de la section interface. Se basant sur les profils à la profondeur de 0.025m du fond, des assemblages ont été effectués (Figures 6.19). Il apparaît par exemple que les configurations C1, C4, C5 et C7 répondent à des distributions qui ne se différencient que par l'amplitude des valeurs de vitesses. Il en va de même pour les configurations C3 et C8, ainsi que C10 et C11. L'assemblage est par contre moins évident entre C2 et C9 qui ont en commun une même orientation de paroi.

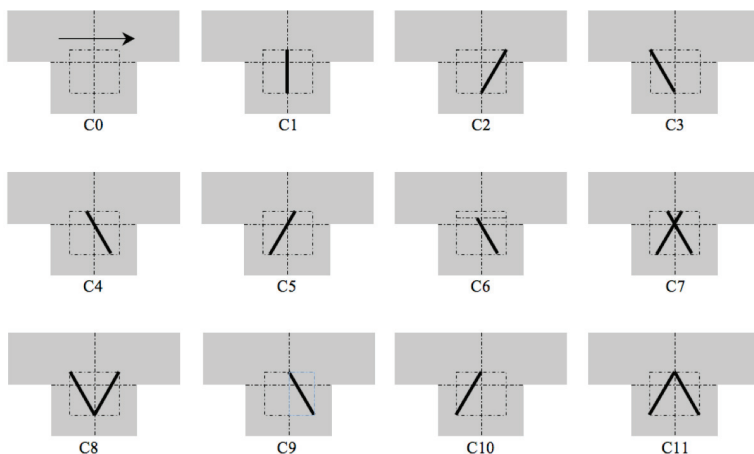


Figure 6.15: Représentation des 12 configuration par la position et l'orientation de la paroi de dérivation dans le refuge (à titre de rappel pour la lecture des profils de vitesses).

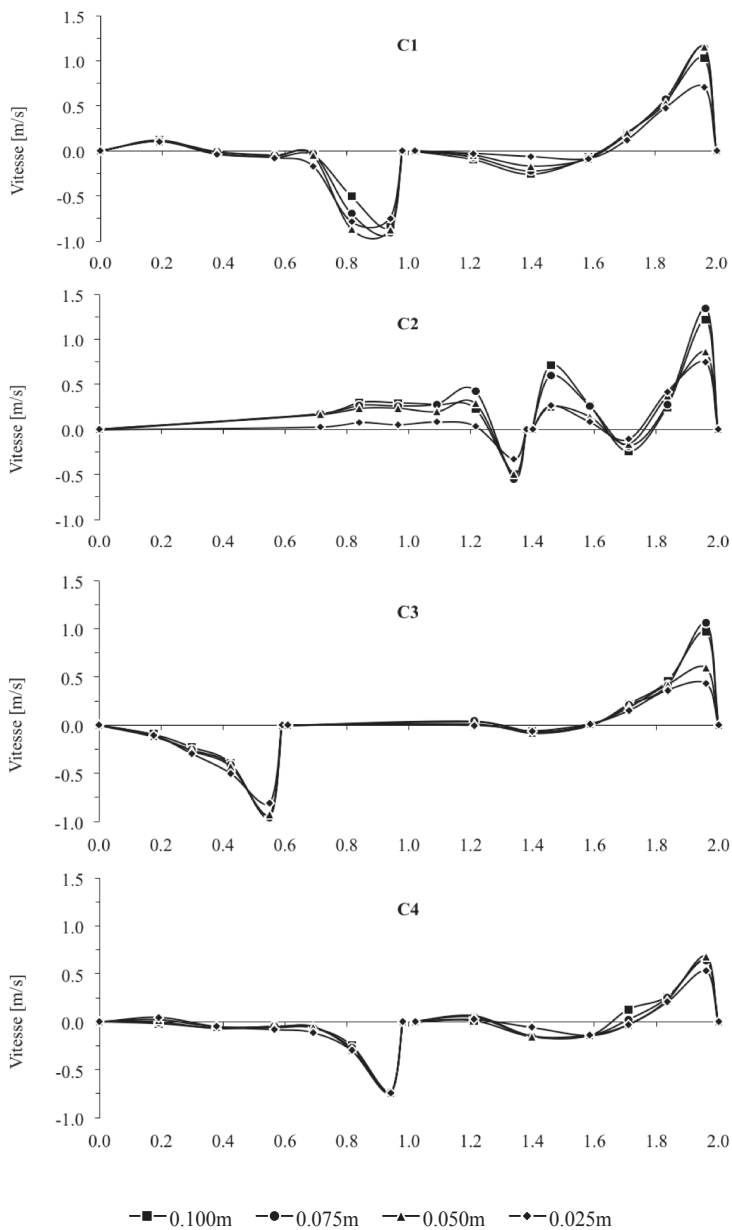


Figure 6.16: Distribution horizontale des vitesses le long de la section interface, à 4 niveaux sur le fond. Configurations C1 à C4.

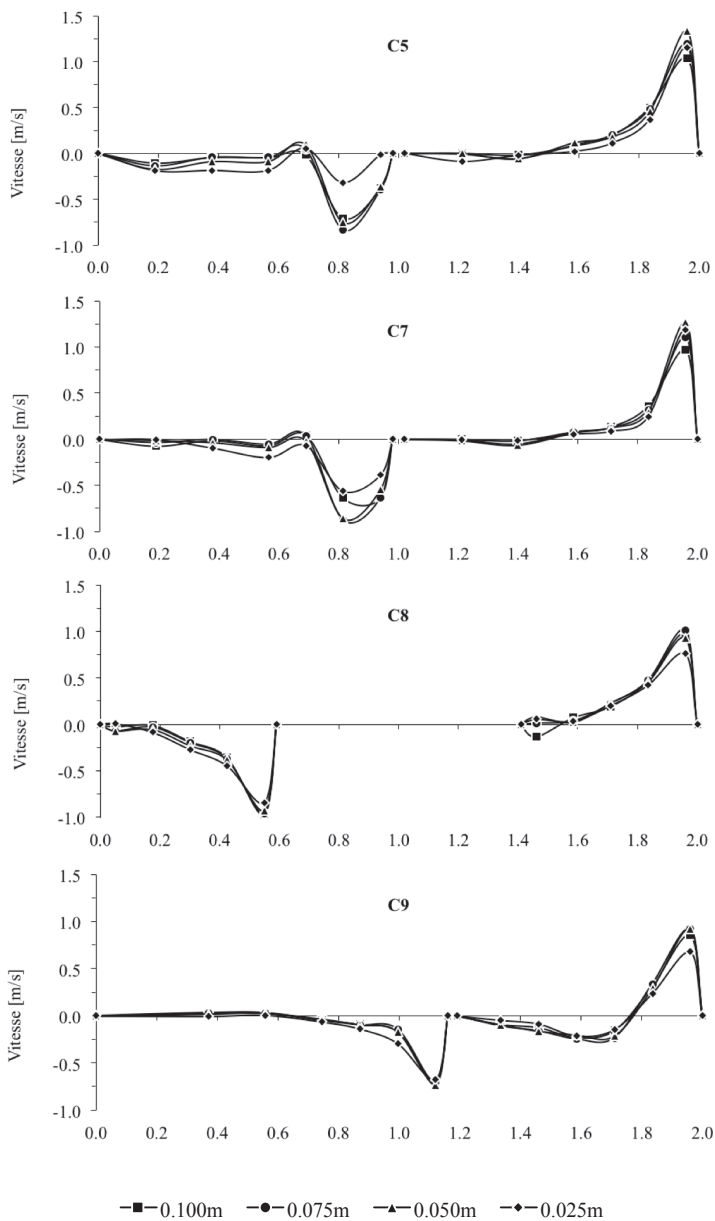


Figure 6.17: Distribution horizontale des vitesses le long de la section interface, à 4 niveaux sur le fond. Configurations C5 à C9.

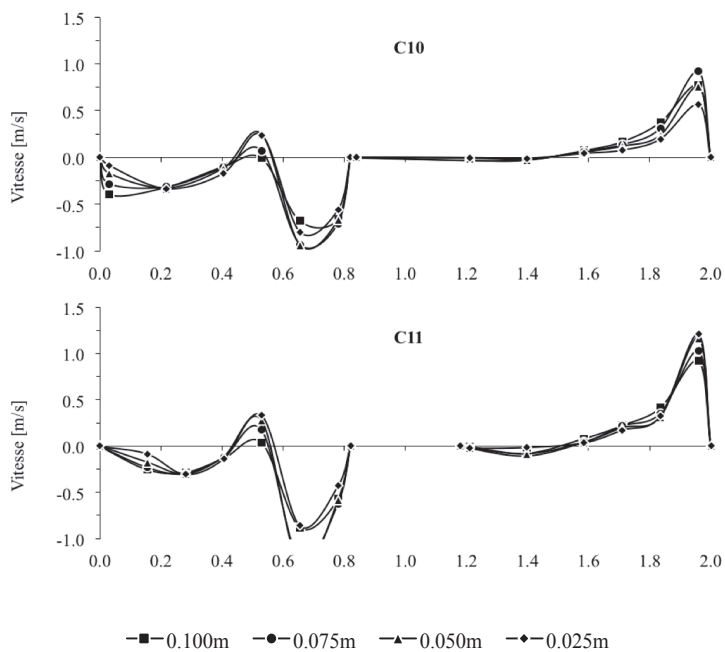


Figure 6.18: Distribution horizontale des vitesses le long de la section interface, à 4 niveaux sur le fond. Configurations C10 à C11.

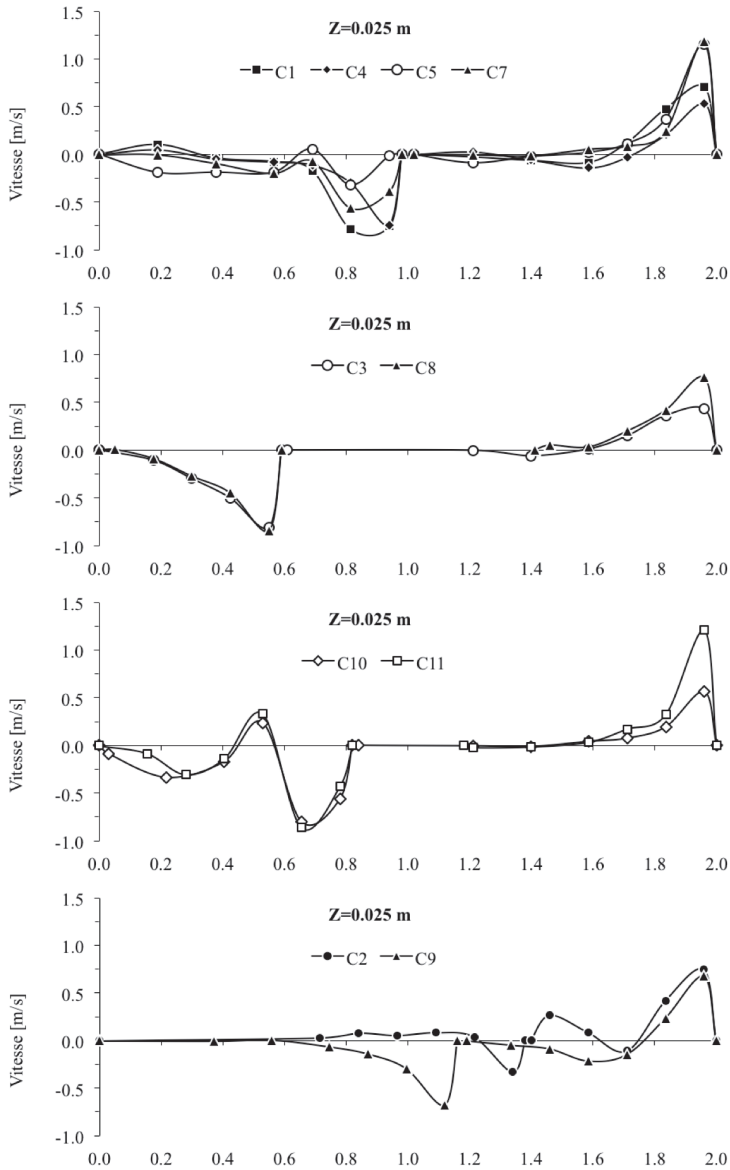


Figure 6.19: Distribution horizontale des vitesses le long de la section interface, à la profondeur $Z = 0.025$ m du fond, regroupements selon la ressemblance des profils.

La figure 6.20 regroupe les valeurs extrêmes de l'ensemble des configurations testées, en distinguant les 4 profils horizontaux analysés. Implicitement les valeurs maximales correspondent toutes au flux sortant du refuge en aval de la paroi de dérivation, alors que les valeurs minimales concernent le flux entrant en amont de la paroi de dérivation. Toutes configurations et tous niveaux confondus, les vitesses maximales se dispersent autour d'une moyenne de 0.94 m/s avec un écart type 0.23 m/s. De même, les valeurs minimales ont pour moyenne -0.78 m/s avec un écart type de 0.19 m/s.

Si les valeurs minimales sont l'expression de l'importance du flux entrant dans le refuge, il faut garder à l'esprit que les vitesses maximales sont représentatives du signal par lequel les poissons perçoivent la présence du refuge et y pénètrent. Dans ce contexte, leur direction est tout aussi importante que leur intensité. Celle-ci est forcée par la paroi de sortie du refuge, orientée perpendiculairement à l'axe longitudinal du canal principal. De plus, la jonction à angle droit provoque le décollement du flux sortant juste en aval de l'extrémité aval du refuge. L'espace protégé à cet endroit est essentiel pour le cheminement du poisson en direction du refuge. En effet il a été observé que la tranquillité qui règne dans cette zone morte est utilisée par les poissons en phase d'attente.

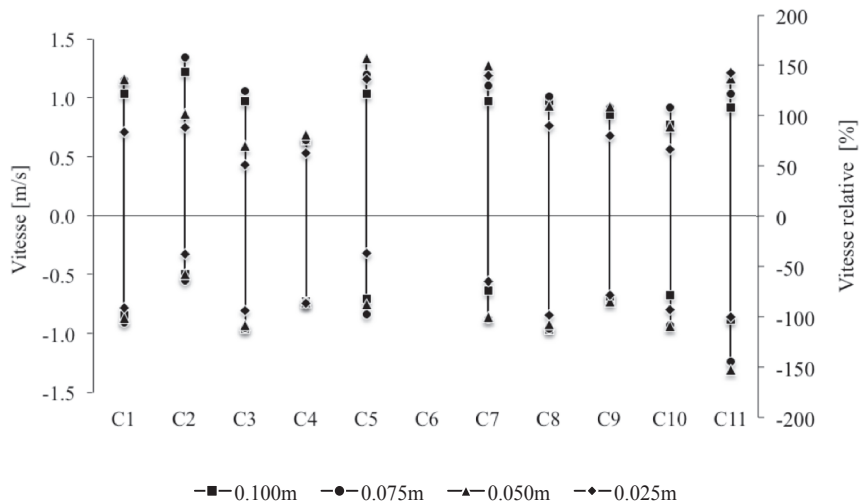


Figure 6.20: Vitesses maximales et minimales de chaque configuration, à 4 distances du fond. Valeurs effectives sur l'axe de gauche. Valeurs relatives par rapport à la vitesse moyenne dans le canal de 0.79 m/s, sur l'axe de droite.

En conclusion de cette analyse des vitesses dans la section interface, il convient de rappeler que les informations issues des mesures UVP ne constituent pas un but en soi. Elles sont destinées à apporter des explications nuancées sur les conditions hydrauliques recherchées par les poissons pour accéder au refuge. Il en sera donc question au chapitre 7.

Avant cela, une ultime comparaison est proposée entre les vitesses extrêmes simulées par BASEMENT 2D et celles mesurées par UVP à la profondeur de nage des poissons, soit 0.025m sur le fond. Il serait en effet appréciable dans le cadre de projets, de pouvoir concevoir le refuge à l'aide d'un logiciel 2D, facile d'utilisation. Pour cela, il faut préalablement vérifier si les vitesses calculées sont proportionnelles à celles mesurées à proximité du fond.

Pour toutes les configurations sauf C0 et C6, le tableau 6.2 montre que les valeurs UVP sont systématiquement plus importantes que celles simulées, aussi bien pour les maxima et minima que pour les moyennes et les écarts types. Ce constat confirme les observations faites antérieurement.

Section interface	Partie en amont de la paroi de dérivation				Partie en aval de la paroi de dérivation			
	Maxi	Mini	Moy	Etype	Maxi	Mini	Moy	Etype
Vitesses [m/s]								
UVP, Z=0.025m	-0.32	-0.86	-0.67	0.20	1.21	0.43	0.80	0.29
BASEMENT 2D	-0.29	-0.61	-0.41	0.15	0.92	0.53	0.78	0.10

Tableau 6.2: Valeurs des vitesses maximales, minimales, moyennes et de l'écart-type, sur les 2 parties de la section interface, toutes configurations confondues, sauf C0 et C6. Les valeurs UVP sont données à la profondeur Z=0.025m sur le fond. Les valeurs BASEMENT sont des moyennes sur la hauteur d'eau.

Dans le but de dégager une éventuelle tendance, les valeurs minimales et maximales ont été mises en relation sur les figures 6.21 a et b. Sur la figure 6.21a, les points constituent un nuage qui peut être décomposé en 3 groupes de configurations, soit C2-C5-C7, C3-C4-C8-C9 et C1-C10-C11. S'ils sont associés 2 par 2, des droites de régression pourraient être tracées. Sans cela une corrélation entre ces 2 vitesses minimales n'est pas apparente, alors que les vitesses minimales BASEMENT sont systématiquement plus petites en valeur absolue que celles mesurées par UVP. Il faut en suite observer sur la figure 6.21b, que les vitesses moyennes produites avec BASEMENT 2D, sont selon les configurations, plus petites ou plus grandes que celles mesurées en profondeur par UVP. Le rapport entre ces 2 vitesses n'est donc pas constant entre les configurations. La disposition des points sur la figure 6.21b montre une faible variation des vitesses BASEMENT en regard de la grande variation des vitesses UVP. Les vitesses BASEMENT sont légèrement décroissantes quand les vitesses

UVP augmentent de manière marquée. Cette comparaison permet de constater qu'une corrélation n'existe pas de manière évidente entre les vitesses maximales mesurées à 0.025m sur le fond dans la partie de la section interface qui se trouve en aval de la paroi de dérivation, et celles obtenues par simulation BASEMENT 2D.

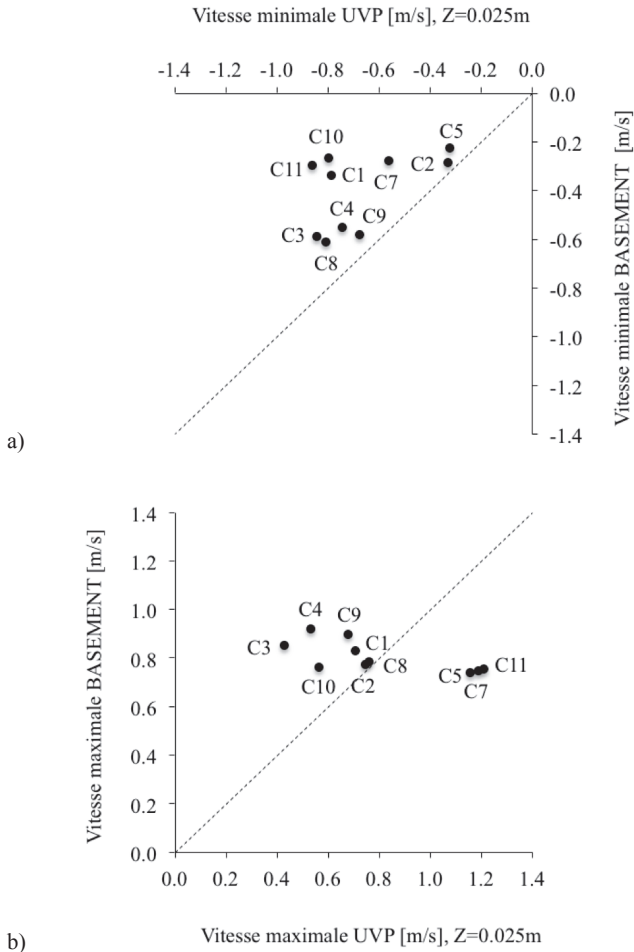


Figure 6.21: Vitesses de pointes dans la partie de la section interface située a) en amont, b) en aval de la paroi de dérivation, mesurées par UVP à la distance $Z=0.025\text{m}$ du fond, comparées avec celles simulées avec BASEMENT 2D, pour l'ensemble des configurations sauf C0 et C6.

6.4.9 Section du canal située en aval du refuge

Comme rappelé ci-dessus, les conditions hydrauliques qui caractérisent la section du canal en aval de la sortie du refuge contribuent au cheminement montant du poisson vers le refuge. Dès lors il était utile d'examiner la distribution des vitesses dans cette section. Les 6 transducteurs ont été disposés de manière symétrique dans une section située 0.75m en aval de l'angle de sortie du refuge (Figures 6.4 et 6.5, Tableau 6.1). A nouveau, 4 profils horizontaux ont été reconstitués. Pour la comparaison, les configurations C1 et C4 sont retenues (Figure 6.22).

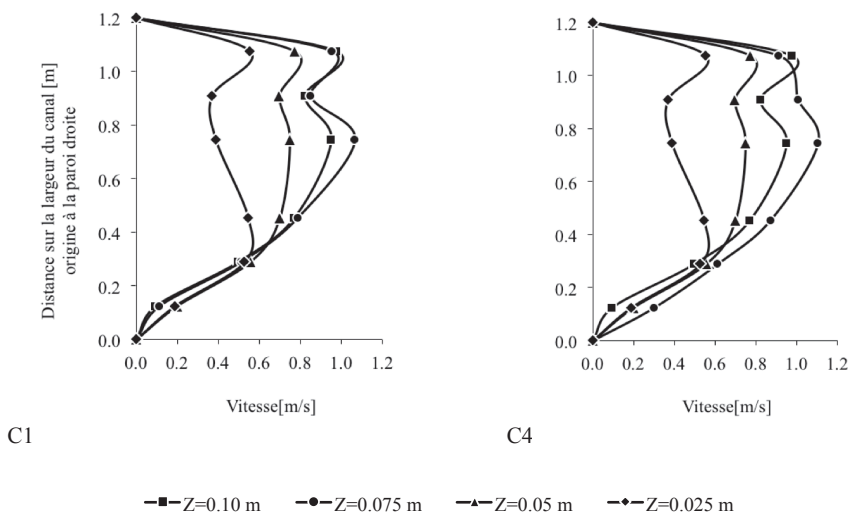


Figure 6.22: Distributions des vitesses UVP dans 4 plans horizontaux (origine Z sur le fond), de la section du canal située 0.75m en aval de la sortie du refuge (8.75m de l'entrée du canal), pour les configurations C1 et C4.

Dans les 2 configurations examinées les profils de vitesses sont asymétriques avec la présence confirmée de la zone à vitesse réduite fréquentée par les poissons en rive droite. De manière compensatoire, le flux principal est repoussé vers la partie gauche de la section du canal (Figure 6.23). La largeur contributive du canal étant ainsi réduite, les vitesses maximales sont plus élevées que dans la même section située en amont de refuge. Une ondulation de la surface libre est observée dans la zone de restitution du débit dérivé sans apparition de ressaut. Le régime reste donc fluvial. La réduction de vitesse observée à 0.9m de la paroi droite résulte du sillage naissant de la paroi de dérivation. Les différences visibles entre les profils des configurations C1 et C4 sont à mettre sur le compte de la spécificité.

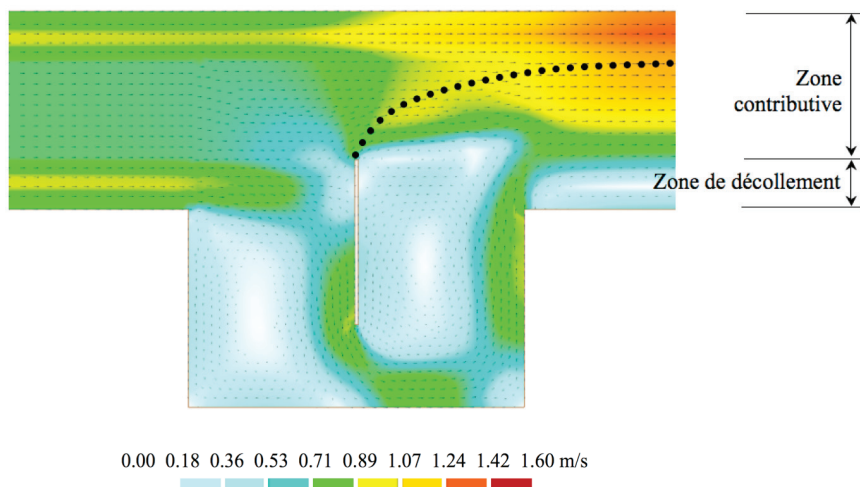


Figure 6.23: Configuration C1. Association du profil de vitesses mesurées par UVP, dans la section du canal située en aval du refuge, avec le champ de vitesses simulée avec Basement 2D. La courbe en pointillé indique le sillage naissant de la paroi de dérivation.

6.5 Conclusions des mesures de vitesses

6.5.1 Technique et sections de mesures de vitesses d'écoulement

Les mesures de vitesses ont été effectuées avec la technique du Profileur de Vitesses par Ultrasons (UVP). Cette technique a été retenue à la suite d'une analyse qui comprenait aussi sur le micromoulinet et la vélocimétrie par images de particules à large échelle (LSPIV). Les mesures UVP ont été faites avec 6 transducteurs permettant de relever simultanément le champ vertical de vitesses dans une section. 3 sections ont été retenues comme caractéristiques. Dans le canal, une section est prise à 2m en amont de l'entrée du refuge et une autre est prise 0.75m en aval de la sortie du refuge. La 3^{ème} section couvre l'interface entre le canal et le refuge.

6.5.2 Mesures de vitesses

Dans la section du canal située en amont du refuge, une légère dissymétrie du profil horizontal de vitesses est constatée. L'accent est mis sur l'importance du nettoyage de la grille d'entrée du canal pour maintenir une distribution de l'écoulement sur toute la section. Dans la section interface, une comparaison de la distribution et de l'intensité des vitesses moyennes

est faite entre les mesures faites par UVP et au micromoulinet ainsi que celles simulées avec BASEMENT 2D. Plus structurées, la distribution UVP est surtout marquée par des vitesses de pointe plus importante. Les profils verticaux ont une forme ventrue avec un maximum apparent à la profondeur 5 à 7 cm sur le fond. Puis les distributions sont analysées pour les différentes configurations.

7 ANALYSE DES RESULTATS

7.1 Introduction

Comme déjà mentionné, cette recherche vise à établir les bases scientifiques pour l'élaboration de refuges à poissons, à aménager dans les berges de rivières soumises aux éclusées hydroélectriques. En considérant le poisson comme indicateur, la démarche consiste à observer son comportement lors de son déplacement vers le refuge et à expliciter les conditions hydrauliques sur son cheminement. Ce sujet se situe donc à l'interface entre les 2 domaines scientifiques complémentaires que sont l'hydrodynamique des écoulements à surface libre et la biologie comportementale de la truite fario. C'est pourquoi, l'expérimentation avec des poissons a été retenue comme méthode de recherche. Afin de reconstituer des conditions naturelles, un canal écohydraulique a été construit pour l'occasion. Préalablement à la phase expérimentale, des configurations de refuge ont été étudiées par simulation numérique 2D, avec le logiciel BASEMENT et le processeur SMS. Ensuite, des essais systématiques ont été effectués dans le canal où des groupes de truites fario juvéniles ont été soumis à des situations comparables à des éclusées. Enfin, des profils de vitesse d'écoulement ont été mesurés dans des sections caractéristiques avec une instrumentation UVP.

Face à la complexité des phénomènes, il a été choisi de se concentrer sur des emplacements caractéristiques du dispositif expérimental. Ainsi, la section à l'interface entre le refuge latéral et le canal principal a été auscultée de manière prépondérante. Que ce soit la phase de simulation, celle des essais avec les poissons ou encore celle de mesure de profils de vitesses, chacune est constituée de l'acquisition puis de l'analyse des paramètres clés, le tout relaté dans les chapitres 4, 5 et 6 de ce mémoire. Il convient cependant de remarquer que la procédure suivie à travers ces chapitres, est basée sur la dissociation des éléments en jeu, à savoir le débit dérivé, le taux de présence des poissons dans le refuge et les vitesses d'écoulement dans la section interface. Or, cette approche ne trouve son sens que dans la superposition de l'ensemble des informations collectées. C'est la substance de ce 7^{ème} chapitre. Sur la base des informations et connaissances acquises, des corrélations simples sont recherchées entre le taux de présence des poissons dans le refuge et différents paramètres hydrauliques et géométriques, qui caractérisent le refuge. Une étude de corrélations multiples n'a pas donné de résultats. Puis, une analyse de la distribution des entrées de poissons dans le refuge par la section interface est effectuée pour chaque configuration et globalement. Enfin, les enseignements qui peuvent être extraits de cette étude, sont mis en évidence.

7.2 Recherche de corrélations simples

7.2.1 Objectifs et démarche de la recherche de corrélations simples

Jusqu'ici, les informations acquises ont volontairement été maintenues dans leur contexte propre. Il eut pourtant été possible, par exemple, de corrélérer le débit dérivé avec la vitesse maximale à la sortie du refuge. Une telle opération serait justifiable d'un point de vue hydraulique. Toutefois, cette vitesse caractéristique serait reconnue comme variable dépendante du débit dérivé et n'apporterait aucune information au sujet du comportement des poissons qui entrent et séjournent dans le refuge. Ne sachant pas ce qui attire le poisson vers le refuge, ladite vitesse pourrait être considérée comme le signal d'attrait. Cependant, le décollement qui se forme derrière l'angle de sortie du refuge, de même que la cellule de rotation qui persiste au dos de la paroi de dérivation (Figure 4.7), sont apparemment aussi des éléments que le poisson recherche dans son cheminement. De plus, une part non-négligeable des entrées a lieu dans la partie située en amont de la paroi de dérivation. Ce secteur est caractérisé par la formation d'un point d'arrêt et le développement d'une autre cellule de rotation importante. L'envergure de ces structures d'écoulement est probablement dépendante du débit dérivé mais peut être faut-il y associer l'orientation de la paroi? Ce questionnement justifie la conservation à l'état de variables indépendantes des paramètres géométriques et hydrauliques du refuge et des écoulements induits par sa présence. Rien n'empêche par la suite de reconsidérer ce statut, attribué à priori dans le but de réduire le nombre de paramètres significatifs.

L'objectif de cette recherche est de maximiser la fréquentation piscicole du refuge latéral, par des entrées aussi bien en amont qu'en aval de la paroi de dérivation. Le taux de présence s'impose évidemment comme unique variable dépendante. Les variables indépendantes sont alors regroupées en 2 catégories. Les paramètres géométriques, représentatifs de la position et de l'orientation de la paroi de dérivation, les longueurs respectives des sections à l'interface situées en amont et en aval de la paroi de dérivation, ainsi que l'angle d'orientation de cette paroi à l'entrée du refuge. Les paramètres hydrauliques sont le débit dérivé ainsi que les vitesses maximales et minimales dans la section à l'interface. En référence à la figure 7.1, le tableau 7.1 regroupe les valeurs numériques de ces paramètres pour l'ensemble des configurations testées.

Dans la perspective de l'utilisation du refuge pour des applications en rivières, les résultats de cette recherche ne sont plus produits en valeurs effectives mais en valeurs relatives. Ainsi, la longueur de la ligne interface qui vaut 2.0m est prise comme référence pour toutes les longueurs impliquées. Par exemple, la longueur de la ligne interface située en amont ou aval de la paroi de dérivation est exprimée en proportion de la longueur totale de cette ligne. De même, le débit dérivé est exprimé par rapport au débit total de 220 l/s qui s'écoule dans le

canal durant les essais avec les poissons. Enfin, les vitesses minimales et maximales le long de la ligne interface sont exprimées en proportion de la vitesse moyenne dans le canal principal, calculée à 0.79 m/s (Tableau 5.3).

Configuration		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
Taux de présence 1)	%	74.3	75.0	82.4	78.5	67.8	67.4	73.7	87.4	57.4	80.6	79.4
Débit dérivé 2)	l/s	42.7	37.3	48.5	40.2	30.9	23.5	32.8	40.3	34.1	32.9	36.7
	%	19	17	22	18	14	11	15	18	15	15	17
Vitesse minimale 3)	m/s	-0.79	-0.33	-0.81	-0.74	-0.32		-0.56	-0.84	-0.68	-0.80	-0.86
	%	-100	-42	-103	-94	-41		-71	-106	-106	-101	-109
Vitesse maximale 3)	m/s	0.71	0.75	0.43	0.53	1.16		1.19	0.76	0.68	0.57	1.21
	%	90	95	54	67	147		151	96	86	72	153
Longueur amont 4)	m	0.99	1.38	0.60	0.99	0.99	0.99	0.99	0.60	1.17	0.81	0.81
	%	50	69	30	50	50	50	50	30	59	40	40
Longueur aval 4)	m	0.99	0.60	1.38	0.99	0.99	0.99	0.99	0.60	0.81	1.17	0.81
	%	50	30	69	50	50	50	50	30	40	59	40
Angle amont 5)	°	90	120	60	60	120	60	120	60	60	120	120
Angle aval 5)	°	90	120	60	60	120	60	60	120	60	120	60
Long. pénétration 6)	m	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.15	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30

Tableau 7.1: Paramètres géométriques et hydrauliques des configurations, les chiffres en caractères droits indiquent les valeurs effectives, les chiffres en italique indiquent les valeurs relatives. 1) Taux de présence des poissons dans le refuge, 2) Débit dérivé dans le refuge, valeur relative au débit de 220 l/s dans le canal, 3) Vitesses minimale/ maximale le long de la section à l'interface amont, à la profondeur 0.025m du fond, valeurs relatives à la vitesse moyenne de 0.79 m/s dans le canal, 4) Longueur de la section interface située en amont/aval de la paroi de dérivation, valeur relative à la longueur totale de 2m, 5) Angle d'orientation de la face amont/aval, de la paroi de dérivation, 6) Longueur de pénétration de la paroi de dérivation dans la section du canal principal.

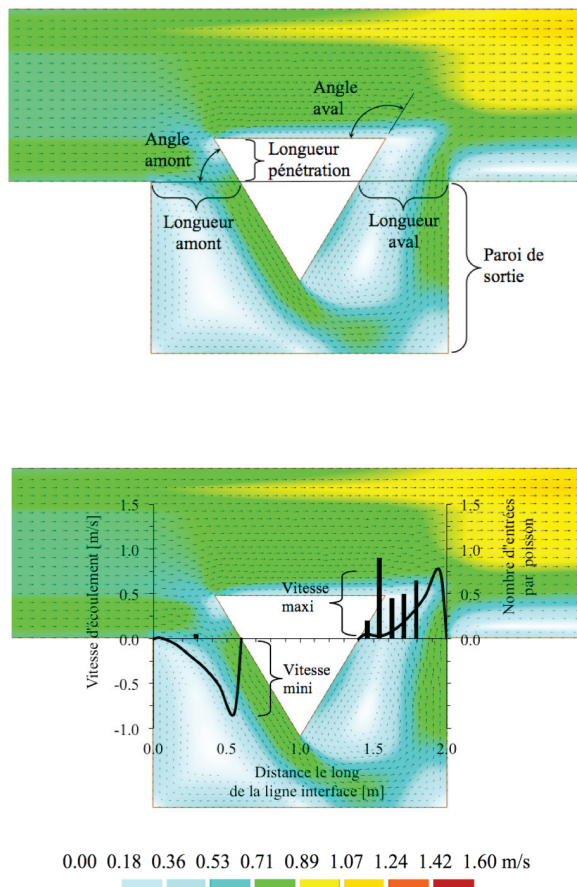


Figure 7.1: Représentation graphique des désignations figurant au tableau 7.1, en superposition du champ de vitesses de la configuration C8. a) paramètres géométriques, b) paramètres hydrauliques.

7.2.2 Corrélations simples entre le taux de présence et les paramètres géométriques

Longueur de la ligne interface en aval de la paroi de dérivation : Lors des essais, l'entrée des poissons dans le refuge semblait plus ou moins aisée selon les configurations. En effet, il n'était pas rare de voir des individus repoussés vers le canal par le courant sortant. Ce constat concerne certaines configurations dont la longueur de section interface située en aval de la paroi de dérivation est courte. Pour cette raison, la première recherche de corrélation s'oriente vers cette grandeur. Sur la figure 7.2, le taux de présence des poissons est présenté en fonction

du ratio entre la longueur aval et la longueur totale de la ligne interface. Ce type de présentation adimensionnelle sera d'ailleurs généralisé aux autres paramètres analysés, en vue d'une utilisation en similitude du refuge, pour des applications en rivière. Malgré l'impression acquise par l'observation, la répartition des points ne montre pas une évidente sensibilité du taux de présence à la variation de la longueur aval. Le domaine défini par l'écart type de $\pm 8,3\%$ autour de la valeur moyenne du taux de présence, qui vaut 75% (C0 exclue), contient la plupart des configurations. Seules s'en écartent les configurations C8 comme valeur supérieure, et C9 comme valeur inférieure. De plus, les meilleurs taux de présence sont obtenus pour les valeurs extrêmes de cette longueur (Configurations C3 et C8). Il est donc possible de retenir que la longueur aval seule n'influence pas significativement le taux de présence, dans l'intervalle des valeurs testées compris entre 0.6 et 1.4m, correspondant à 30 et 70% de la longueur totale de la ligne interface. De ce fait, les longueurs aval d'interface des configurations qui produisent un taux de présence supérieur ou égal au taux moyen sont comprises dans ce même intervalle.

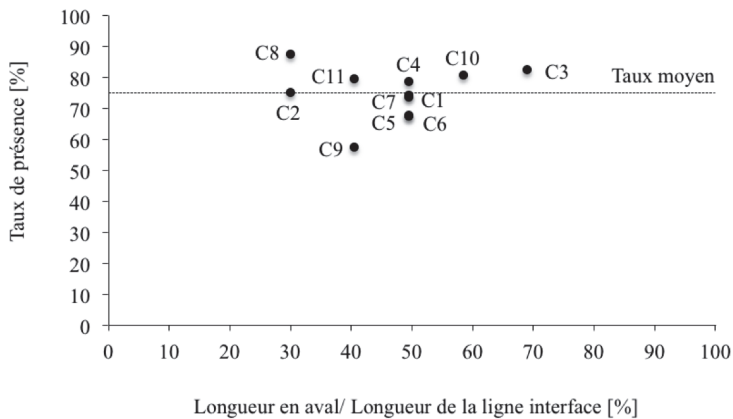


Figure 7.2: Taux de présence des poissons dans le refuge, rapporté à la longueur relative de la partie de la section interface située en aval de la paroi de dérivation (appelée aussi longueur de sortie). Le traitillé horizontal indique le taux moyen de 75%.

Longueur de la ligne interface en amont de la paroi de dérivation : Concernant la longueur de la partie de la section interface située en amont de la section interface, il a été remarqué au chapitre 4 qu'elle influençait les conditions de circulation d'eau dans le refuge et en particulier le débit dérivé. Il était dès lors intéressant d'examiner si un lien peut être établi entre le taux de présence et cette grandeur. Selon les chiffres du tableau 7.1, les taux de présence les plus importants, relatifs aux configurations C3 et C8, sont atteints pour une longueur amont de 0.6m, soit la plus petite valeur testée. La représentation graphique des

valeurs relatives aux différentes configurations testées, C0 exclue, permet de voir que le taux de présence est décroissant avec l'augmentation de la longueur amont (Figure 7.3). Cette représentation laisse apparaître une dépendance du taux de présence envers la longueur d'entrée du refuge. Dans l'intervalle compris entre 0.6 et 1.4m, les taux de présence les plus élevés sont obtenus pour une longueur de 0.6m, équivalente à 30% de la longueur totale de la ligne interface.

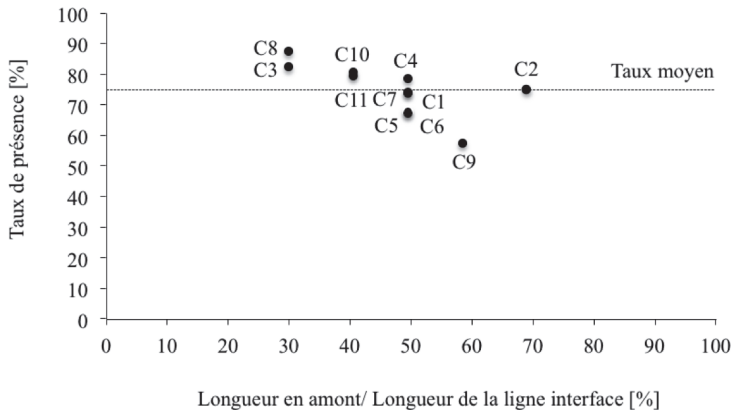


Figure 7.3: Taux de présence des poissons dans le refuge, rapporté à la longueur relative de la partie de la section interface située en amont de la paroi de dérivation. Le traitillé horizontal indique le taux moyen de 75%.

Angle d'orientation de la paroi de dérivation : Concernant l'angle d'orientation de la paroi de dérivation, il est à relever que les configurations C3 et C8 ont en commun une valeur de 60° pour la face amont. L'influence de cet angle n'a pas été testée finement sur toute sa gamme de variation, mais uniquement pour les valeurs de 60, 90 et 120°. Il n'est donc pas envisageable de tracer une fonction continue relative à ce paramètre. Son influence sur le débit dérivé est analysée au chapitre 4 où il a été remarqué, qu'à longueur d'entrée équivalente, la paroi orientée à 60° dérive un plus grand débit que celle orientée à 120°. Mais il a aussi été constaté que l'influence de la longueur d'entrée était plus importante. De ce fait, l'angle d'orientation est considéré ici comme paramètre de pondération. D'un point de vue descriptif, le taux de présence le plus élevé est atteint avec la configuration C8. Celle-ci comprend un dispositif de dérivation constitué d'un triangle équilatéral dont la base se situe dans le canal, parallèlement à son axe, et le sommet à l'intérieur du refuge. Selon la référence établie, l'angle d'orientation est de 60° à l'entrée et de 120° à la sortie. D'autre part, l'angle de 60° à l'entrée correspond au taux de présence le plus élevé, soit celui des configurations C8 et C3, mais aussi au plus faible, celui de la configuration C9. Il convient en outre de remarquer les taux de présence

élevés des configurations C10 et C11, avec un angle d'orientation amont de 120° alors que leur longueur d'interface amont de 0.81m est à peine supérieure à celle des configurations C3 et C8. Il semble donc que les angles d'orientation de la paroi de dérivation n'ont qu'une influence subsidiaire sur le taux de présence.

Longueur de pénétration : Enfin, une corrélation est envisageable entre le taux de présence et la longueur de pénétration de la paroi de dérivation dans la section du canal principal (Tableau 7.1). Cette valeur est de 0.30m pour toutes les configurations sauf C6, pour laquelle elle est de 0.15m (Figure 3.13). De ce fait, la comparaison ne peut être effectuée qu'entre les configurations C4 et C6, dont le positionnement des parois de dérivation est identique. Dans ce contexte, la plus grande longueur de pénétration de la configuration C4 conduit à un taux de présence bien plus important que celui obtenu avec C6, soit respectivement 78% et 67%. La portée de ce constat est limitée à cette seule comparaison. Il est dès lors difficile d'en tirer une conclusion générale, en raison du déficit d'informations pour des longueurs de pénétration différentes de 0.30m. Néanmoins, il est possible d'affirmer que la longueur de pénétration de 0.30m, représentant 25% de la largeur du canal principal, est à la base de taux de présence très élevés. A ce titre, cette valeur peut être prise comme référence pour la conception du refuge.

De manière générale, les paramètres géométriques pourraient être considérés comme non-influents pour le poisson, du moins de manière directe. En effet, le poisson ne réagit pas à des dimensions si ce n'est la profondeur, qui n'est pas une variable des essais effectués. Par contre les paramètres géométriques ont une influence indirecte puisqu'ils conditionnent le comportement hydraulique.

7.2.3 Corrélations simples entre le taux de présence et les paramètres hydrauliques

Comme le montrent les résultats des essais avec les poissons (Figure 5.9), la paroi de dérivation induit, dans toutes les configurations qui la comportent, un taux de présence des poissons dans le refuge considérablement plus élevé que celui de la configuration C0 où elle est absente. L'installation de la paroi de dérivation génère un flux à travers le refuge qui en ressort en créant des conditions hydrauliques favorables à l'entrée du poisson. Le flux et les conditions hydrauliques invoqués, sont paramétrés par le débit dérivé et la vitesse maximale le long de la section interface, toujours considérée à la profondeur de nage des poissons, soit à 0.025m du fond. Il est donc opportun d'évaluer leur impact. Implicitement, la vitesse minimale est associée à cette analyse.

Débit dérivé à travers le refuge : La figure 7.4 représente le taux de présence des poissons dans le refuge en fonction du débit dérivé rapporté au débit total dans le canal, qui est de 220 l/s. La répartition des points relatifs aux différentes configurations, montre une croissance

du taux de présence en fonction du débit dérivé, dans l'intervalle de 23.5 à 48.5 l/s soit 10 à 22 % du débit dans le canal. Dans le domaine des observations, la dépendance directe du taux de présence au débit dérivé dans le refuge est ainsi constatée. A noter que les débits dérivés des configurations qui produisent un taux de présence supérieur ou égal au taux moyen, sont répartis sur un intervalle compris entre 15 et 22%.

Une extrapolation visant à minimiser le débit dérivé est envisageable à l'aide des résultats de la configuration C0. En effet, malgré l'absence de paroi de dérivation cette situation produit un taux de présence non-nul. En considérant que le débit dérivé est proche de zéro dans ce cas, cela revient à faire figurer à titre indicatif, un point supplémentaire à l'origine des débits relatifs, avec un taux de présence de 32.7%.

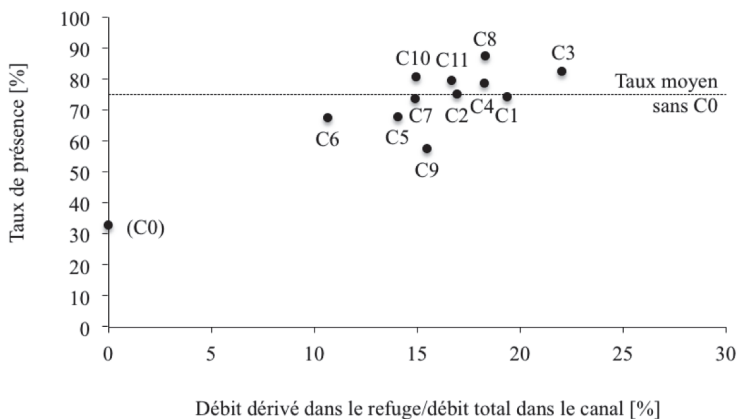


Figure 7.4: Taux de présence des poissons dans le refuge en fonction du débit dérivé relatif. La configuration C0 est mentionnée à titre indicatif.

D'autre part, le constat de croissance du taux de présence en fonction du débit dérivé, pourrait conduire à vouloir maximiser l'un par l'autre. Or, il doit forcément exister une valeur maximale du débit dérivé, au delà de laquelle le taux de présence commence à chuter. Cette affirmation se justifie par l'insécurité qui régnerait dans le refuge, ou par son inaccessibilité, avec des conditions hydrodynamiques guère moins contraignantes que dans le canal principal. Du fait que le débit dérivé est soustrait du débit total dans le canal expérimental, il n'était pas possible de rechercher ce seuil. Néanmoins, les taux de présence élevés obtenus lors des essais, poussent à reconnaître que les dimensions choisies conduisent à une bonne performance, avec un débit relatif de 15 à 22%.

Vitesses extrêmes le long de la ligne interface : Les vitesses d'écoulement le long de la section interface, sont marquées par 2 pics de signes opposés. La plus grande valeur positive, dite maximale, est observée dans la partie en aval de la paroi de dérivation alors que la négative, ou minimale, se trouve dans la partie amont (Figures 7.7 à 7.10). Ces vitesses ont été mesurées par UVP, à la profondeur supposée de nage des poissons soit à 0.025m du fond du canal. Concernant les vitesses maximales (Figure 7.5), les points de la plupart des configurations, dont celle (C8) caractérisée par le meilleur taux de présence, sont regroupés dans un intervalle compris entre 0.4 et 0.8 m/s, soit entre 50 et 100% de la vitesse moyenne dans le canal. Toutefois, la configuration C11, qui induit le taux de présence respectable de 79.4%, occasionne une vitesse relative de 160%. De manière générale, la distribution des points montre une variation peu prononcée du taux de présence en fonction de ce paramètre. Dans ce contexte, la configuration C8, pour laquelle la vitesse maximale est de l'ordre de grandeur de la vitesse moyenne dans le canal, peut être prise comme référence pour la conception de refuge en rivière.

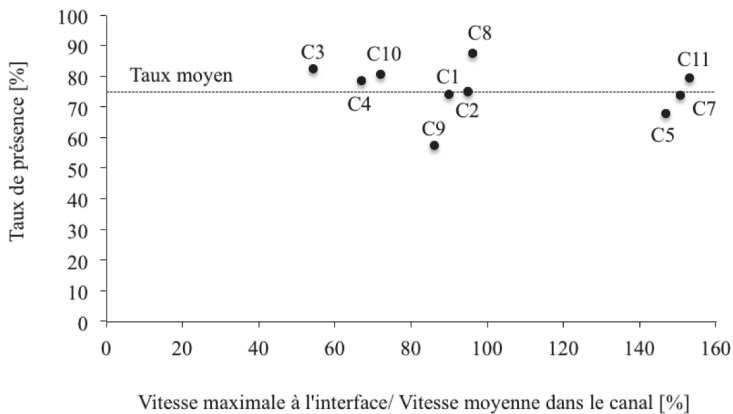


Figure 7.5: Taux de présence des poissons dans le refuge en fonction des vitesses d'écoulement maximales relatives dans la section interface, à 0.025m du fond.

Quant à la vitesse minimale (Figure 7.6) une concentration de points est observée dans l'intervalle de -0.7 à -1.0 m/s. En vitesse relative cela correspond à un ratio de 1.0 à 1.2, soit 100 à 120%. Comme pour les vitesses maximales, l'influence de la vitesse minimale sur le taux de présence est peu marquée.

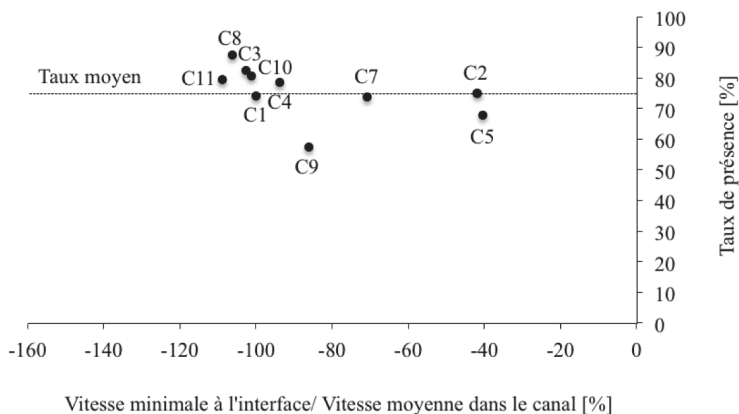


Figure 7.6: Taux de présence de poissons dans le refuge en fonction des vitesses d'écoulement minimales relatives dans la section interface, à 0.025m du fond.

7.2.4 Recherche de corrélations multiples

Des tests ont été effectués avec le logiciel de statistique et d'analyse de données R, en vue de la mise en évidence de corrélations multiples. Reprenant les paramètres examinés pour les corrélations simples, une matrice de corrélations montre que le débit dérivé, la longueur amont et la vitesse minimale ont la plus forte corrélation avec le taux de présence. Les coefficients de corrélation sont de l'ordre de 0.5. Les corrélations des autres paramètres sont très faibles. Des combinaisons de paramètres ne donnent pas de résultats significatifs. Une explication est à trouver dans le petit échantillon constitué par le nombre de configurations testées. Finalement ces tentatives aboutissent au constat que les corrélations simples sont les mieux établies. Elles concernent les mêmes paramètres que ceux mis en évidence aux chapitres 7.2.1 à 7.2.4. De ce fait, aucune information nouvelle n'a pu être retirée de cette recherche de corrélations multiples.

7.3 Critères de dimensionnement du refuge

7.3.1 Introduction

Dans la recherche de corrélations entre les variables géométriques et hydrauliques du refuge, le taux de présence des poissons dans le refuge est considéré comme variable dépendante à maximiser. La qualification des configurations testées pourrait donc s'exprimer par cette seule valeur. Leur comparaison se résumerait alors, à reconnaître comme préférable celle qui présente le taux le plus important. Une pareille conclusion serait éventuellement suffisante dans le cas où la forme du refuge devait être arrêtée à celle testée sur le canal de la Maigrauge. Or les attentes sont plus ambitieuses. La taille du refuge est certainement dépendante du nombre de poissons à accueillir et de l'amplitude des éclusées ainsi que de la taille du cours d'eau. Les formes doivent ainsi pouvoir s'adapter aux impératifs de construction et d'aménagement, d'intégration paysagère, de stabilité et de durabilité de l'ouvrage. En particulier, l'étude du transport solide dans le refuge pourrait déboucher sur des exigences de forme différentes, voire antagonistes, de celles imposées par le taux de présence maximum. Le fait que plusieurs configurations donnent des taux de présence très élevés offre un avantage quant à la souplesse d'intégration d'autres exigences, externes au cadre expérimental du travail relaté dans ce mémoire. C'est pourquoi, la démarche d'exploitation et de valorisation des enseignements tirés de cette recherche vise à dégager les points favorables et défavorables à la maximisation du taux de présence et à leur attribuer un degré d'importance ou de sensibilité.

7.3.2 Grandeurs caractéristiques du refuge

L'étude de corrélations simples a porté sur la mise en relation du taux de présence des poissons dans le refuge avec les paramètres géométriques et hydrauliques du refuge. Cela a permis de révéler l'influence plus ou moins marquée associée aux variations des uns et des autres. Ainsi, le taux de présence montre une certaine sensibilité à la variation de la longueur de la partie de la section interface située en amont de la paroi de dérivation, de même qu'au débit dérivé. Le taux maximum est obtenu quand cette longueur représente 30% de la longueur totale de la ligne interface qui est de 2.0m, et va en diminuant quand cette longueur s'accroît. C'est le contraire pour le débit dérivé dont l'accroissement produit aussi celui du taux de présence, jusqu'au maximum obtenu pour une dérivation de 22% du débit total de 220 l/s. D'autre part, des taux de présence élevés sont obtenus avec des angles d'orientation de la paroi de dérivation aussi bien de 60, 90 que de 120°. Il en va de même pour la longueur en aval de la paroi, qui peut varier de 30 à 70% de la longueur totale de la ligne interface sans influence significative. Concernant les vitesses extrêmes le long de la ligne interface, il suffit qu'elles soient de l'ordre de grandeur de la vitesse moyenne dans le canal, en l'occurrence 0.79 m/s, pour observer un taux de présence important. Il convient de rappeler que ces

vitesse sont considérées à la profondeur de nage des poissons, estimée à 0.025m du fond. Ce critère peut être retenu pour la transposition du refuge expérimental à des applications en rivière. Il postule que l'attractivité du refuge sera préservée dès lors que la distribution des vitesses relatives, c'est à dire les vitesses effectives divisées par la vitesse moyenne dans le canal expérimental, sera proportionnellement reproduite dans la section interface. Le domaine de validité de cette application se trouve naturellement dans l'intervalle des valeurs testées. Sur le tableau 7.2 chaque paramètre est représenté par la valeur correspondant au taux de présence maximum, soit celui de la configuration C8, ainsi que par la fourchette des valeurs respectives qui occasionnent un taux de présence supérieur ou égal à 75%. Ce seuil de 75% est retenu car il correspond à la moyenne arithmétique du taux de présence de toutes les configurations testées, C0 exclue. Les valeurs caractéristiques sont retenues comme base de dimensionnement pour la réalisation de refuges en rivière. La fourchette de valeurs donne l'intervalle dans lequel il est possible de dimensionner le refuge tout en préservant un taux de présence supérieur ou égal à la moyenne. La vitesse maximale est la pointe de vitesse observée dans la partie de la ligne interface située en aval de la paroi de dérivation. La vitesse minimale correspond à la pointe de vitesse observée dans la partie de la ligne interface située en amont de la paroi de dérivation (Figure 7.1).

Paramètre	Configuration C8		Fourchette de valeurs qui donnent	
Taux de présence	87.4%		un taux de présence $\geq 75\%$	
Valeur	effective	relative [%]	effective	relative [%]
Longueur amont 1)	0.6m	30	0.6 à 0.8m	30 à 40
Longueur aval 1)	0.6m	30	0.6 à 1.2m	30 à 70
Long. pénétration 2)	0.3m	15	0.3m	15
Débit dérivé 3)	40 l/s	18	34 à 48 l/s	15 à 22
Vitesse minimale 4)	-0.8 m/s	100	-1.0 à -0.6 m/s	90 à 150
Vitesse maximale 4)	0.8 m/s	100	0.4 à 1.2 m/s	50 à 150

Tableau 7.2: Valeurs caractéristiques pour le projet du refuge. 1) Longueur de la ligne interface située en amont (entrée)/aval (sortie) de la paroi de dérivation ; la valeur relative est calculée par rapport à la longueur de la ligne interface égale à 2.0m. 2) Longueur de pénétration de la paroi de dérivation dans la section du canal principal ; la valeur relative est prise par rapport à la longueur de la ligne interface égale à 2.0m. 3) Débit dérivé dans le refuge ; la valeur relative est prise par rapport au débit du canal égal à 220 l/s. 4) Vitesse minimale/maximale mesurée par UVP le long de la section interface à 0.025m du fond ; la valeur relative est prise par rapport à la vitesse moyenne dans le canal, égale à 0.79 m/s. Toutes les désignations sont illustrées sur la figure 7.1.

7.3.3 Comparaison des configurations

Une fois les grandeurs caractéristiques établies, il est nécessaire de donner une forme au refuge en se référant à une configuration, du moins pour esquisser le projet. Dans ce contexte, le seul critère d'appréciation est le taux de présence des poissons dans le refuge. De toute évidence celle qui s'impose par son taux de présence maximum de 87.4% est la configuration C8. Elle est suivie par un groupe de configurations dont le taux, compris entre 78 et 83%, est encore très élevé. Il s'agit des configurations C3, C4, C10 et C11. Puis vient le petit groupe des valeurs qui sont proches de la moyenne de 75%. Il concerne les configurations C1 et C2. Dans la catégorie des valeurs inférieures à la moyenne, se trouvent les configurations C5, C6, C7, puis C9 et enfin C0.

S'il paraît acceptable de qualifier de non-recommandables les configurations C5, C6, C7, C9 et bien sûr C0, une tentative de sélection parmi les meilleures est plus délicate car elle ne peut reposer sur le seul critère du taux de présence. Le groupe des configurations qui donnent les meilleurs taux de présence est dans son ensemble intéressant par la diversité des formes qu'il concerne. Pour des questions de stabilité de paroi, les formes en triangle équilatéral des configurations C8 et C11 sont avantageuses. De plus, elles offrent la possibilité d'exploiter la surface du triangle avec des objectifs écologique et paysager. Par contre, elles sont à priori plus encombrantes que les configurations à paroi simple, ce qui reste à vérifier en relation avec les dépôts de sédiments susceptibles de se former derrière une simple paroi. Sous cet aspect de l'encombrement, il faut aussi considérer que la configuration C11 empiète d'avantage que la configuration C8 sur l'emprise du refuge, laissant moins d'espace interne pour les poissons.

7.3.4 Configuration proposée

En regard des résultats des travaux menés dans le canal expérimental de la Maigrauge, 5 configurations sur les 12 testées, sont recommandables pour des réalisations en rivière. Il s'agit des configurations C8, C3, C4, C10 et C11 (Figure 3.11). Selon les arguments évoqués précédemment, une préférence est accordée à la configuration C8. Outre le fait qu'elle induit le taux de présence maximum, il a été relevé qu'elle présentait d'autres avantages. Avec sa forme d'îlot, l'épi de dérivation occupe une emprise qui lui donne de l'assise et par conséquent de la stabilité face à l'action des courants sur son pourtour. De plus la plate forme qu'elle offre, est favorable à l'implantation d'une végétation arbustive, qui représente un bénéfice écologique et paysager. C'est pourquoi cette configuration C8 est prise comme référence par la suite.

7.4 Analyse des entrées de poissons dans le refuge

7.4.1 Distribution des entrées pour chaque configuration

Le taux de présence des poissons dans le refuge est l'indicateur de performance représentatif des configurations testées. Sa mise en relation avec les paramètres géométriques et hydrauliques du refuge permet de déduire des informations utiles, qui résultent de la considération globale des caractéristiques de la section interface. Des informations plus détaillées sont apportées dans ce chapitre, en vue d'une meilleure perception des conditions hydrauliques recherchées par les poissons dans leur déplacement. En particulier, le nombre d'entrées de poissons dans le refuge, recensé sur des intervalles de 0.10m le long de la ligne interface, est associé aux vitesses d'écoulement correspondantes à la profondeur 0.025m du fond. La représentation graphique superposée de ces 2 distributions est donnée pour chaque configuration, sur les figures 7.7 à 7.10.

Sur ces graphiques, il apparaît que les poissons entrant dans le refuge franchissent la ligne interface de manière préférentielle à l'endroit des plus faibles vitesses d'écoulement, aussi bien en amont qu'en aval de la paroi de dérivation. Celles-ci sont associées aux cellules de rotation respectives (Figure 4.7). Ces zones sont attenantes au couloir de circulation du débit dérivé dans le refuge. En se référant aux champs de vitesses obtenus par BASEMENT 2D (Figures 4.8 et 4.9), il règne dans ces zones un régime tourbillonnaire faiblement actif. Cette observation est confirmée par les profils de vitesses UVP (Figures 7.7 à 7.10).

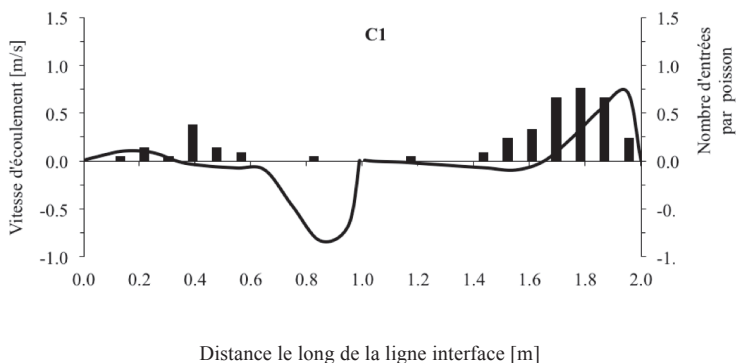


Figure 7.7: Distribution des vitesses d'écoulement le long de la ligne interface (ligne continue), à 0.025m du fond, superposée à la distribution du nombre d'entrées par poisson (bâtonnets verticaux), pour la configuration C1.

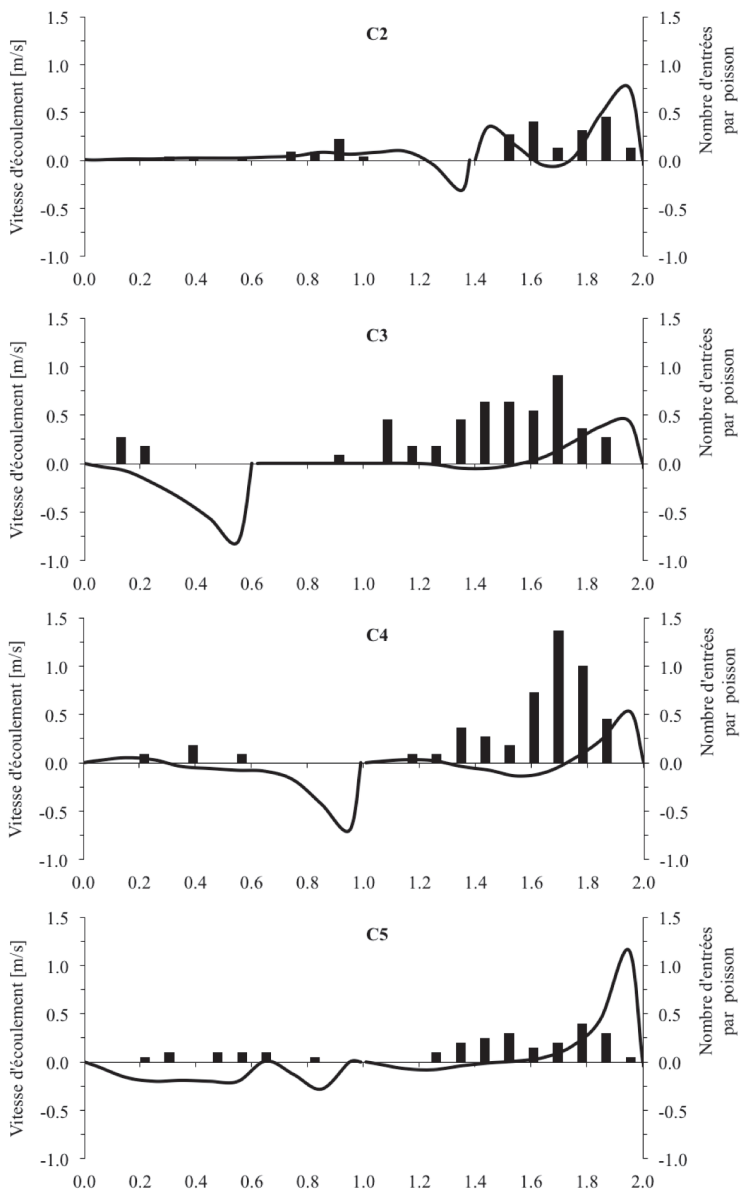


Figure 7.8: Distribution des vitesses d'écoulement le long de la ligne interface (ligne continue), à 0.025m du fond, superposée à la distribution du nombre d'entrées par poisson (bâtonnets verticaux), pour les configurations C2 à C5.

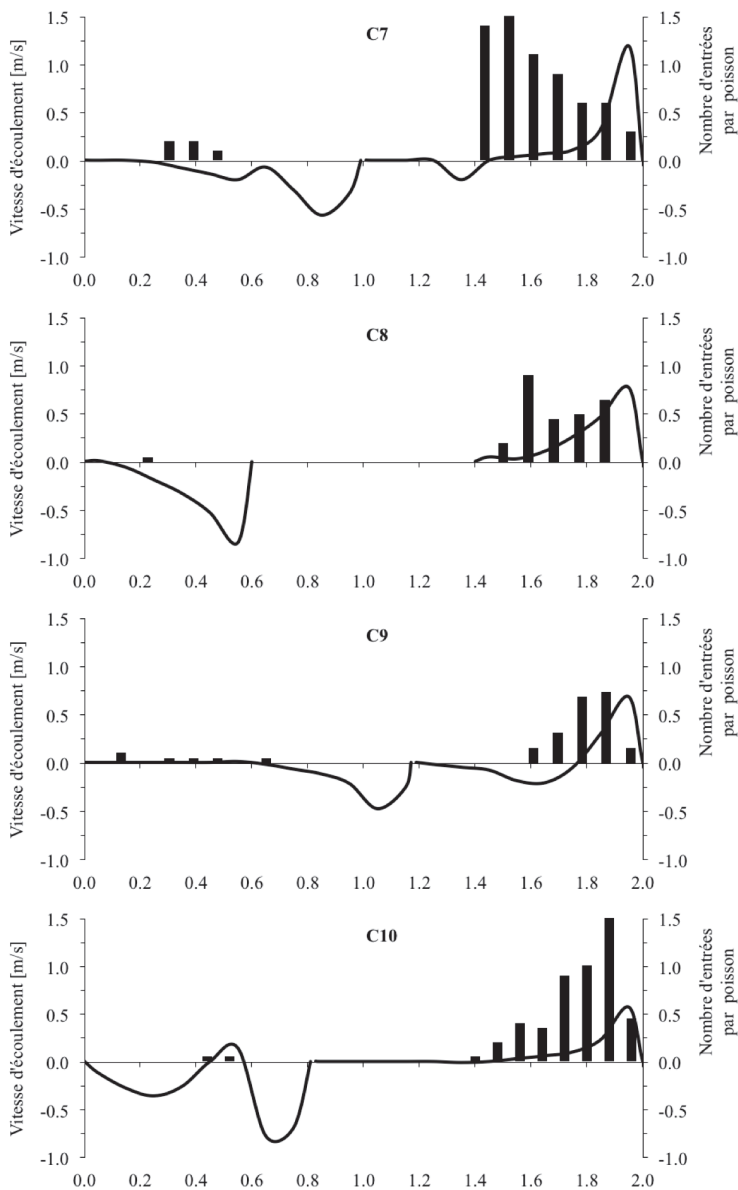


Figure 7.9: Distribution des vitesses d'écoulement le long de la ligne interface (ligne continue), à 0.025m du fond, superposée à la distribution du nombre d'entrées par poisson (bâtonnets verticaux), pour les configurations C7 à C10.

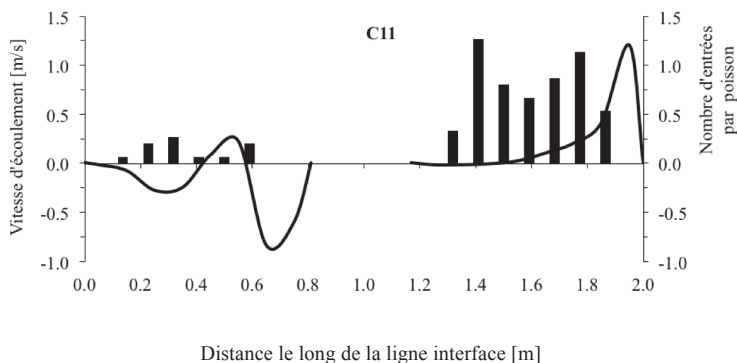


Figure 7.10: Distribution des vitesses d'écoulement le long de la ligne interface (ligne continue), à 0.025m du fond, superposée à la distribution du nombre d'entrées par poisson (bâtonnets verticaux), pour la configuration C11.

7.4.2 Analyse globale de la distribution des entrées de poissons

Fondamentalement, la maximisation du nombre de mouvements de poissons n'est pas un critère de performance du refuge. En effet, il a été montré que le taux de présence maximum ne coïncide pas avec le plus grand nombre d'entrées par poisson (Figure 5.14). C'est pourquoi une recherche de corrélations, comparable à celle effectuée pour le taux de présence, n'a pas été entreprise car elle ne présente pas d'intérêt. De plus, le nombre d'entrées est 4.3 fois plus grand que le nombre de poissons présents dans le refuge, avec un écart type de 1.8. Cela révèle un trait de comportement des poissons observés durant les essais : ils viennent dans le refuge pour se reposer et après quelques minutes retournent dans le canal pour revenir un peu plus tard. Le refuge n'est donc pas utilisé comme lieu de séjour permanent durant les éclusées, mais comme un lieu de récupération momentanée.

Par contre, la comparaison de la distribution du nombre d'entrées de poissons avec celle des vitesses d'écoulement sur la ligne interface, peut apporter de précieuses informations sur les vitesses préférées des poissons dans leur cheminement. Dans ce sens, des couples de valeurs coïncidentes ont été formés à partir des résultats illustrés sur les figures 7.7 à 7.10. Chaque couple lie la vitesse d'écoulement au nombre d'entrées, au même endroit de la ligne interface, pour la même configuration. La ligne interface est subdivisée en 10 intervalles de 0.10m sur lesquels le nombre de poissons entrants a été compté. Les vitesses locales sont prises au centre des intervalles. Au total, la série comprend 188 couples de valeurs pour lesquels 665 entrées sont comptabilisées, toutes configurations confondues, C0 et C6 exclues. Puis les vitesses sont ordonnées par pas de 0.1 m/s et les nombres d'entrées respectifs sont cumulés selon cet ordonnancement. Le résultat de ce traitement est présenté sur la figure 7.11. Il

apparaît clairement que les entrées de poissons dans le refuge ont lieu dans les parties de la section interface où les vitesses d'écoulement sont comprises entre 0.0 et 0.3 m/s, avec une nette dominance pour les valeurs comprises entre 0.0 et 0.1 m/s. Cette affirmation est aussi bien valable pour les entrées par l'amont que par l'aval de la paroi de dérivation.

A première vue, ce constat pourrait laisser croire qu'il suffit d'annuler les vitesses pour attirer le poisson. Toutefois, le lieu des vitesses nulles correspond au point de cisaillement des vitesses situé à l'interface des cellules de rotation attenantes et du couloir de circulation du débit dérivé dans le refuge (Figure 4.7). Cette remarque met en évidence le rôle déterminant du mécanisme hydrodynamique qui se développe dans le refuge. Outre le fait qu'elle produit des vitesses élevées qui signalent la présence du refuge aux poissons, la circulation du débit dérivé dans le refuge, forcée par la paroi de dérivation, génère des cellules de rotation recherchées par les poissons. Comme précédemment, les vitesses examinées sont mesurées à la profondeur présumée où nagent les poissons, soit à 0.025m du fond.

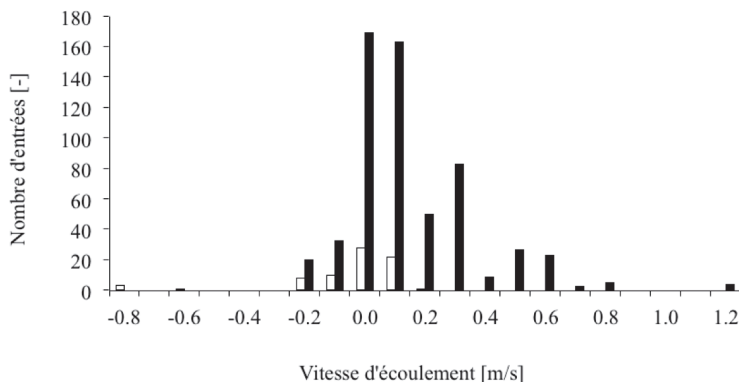


Figure 7.11: Nombre d'entrées de poissons dans le refuge, cumulée sur des intervalles de 0.1m/s, toutes configurations confondues, sauf C0. Les batonnets noirs correspondent à la partie en aval et les batonnets blancs à la partie en amont de la paroi de dérivation.

7.4.3 Analyse des préférences de vitesse dans la section interface

Habituellement, la modélisation des habitats de poissons est fondée sur la combinaison de 3 paramètres, qui sont la vitesse d'écoulement, la hauteur d'eau et la granulométrie du substrat. Comme cela est mentionné au chapitre 3.2.1, le paramètre d'habitat des essais effectués à la Maigrauge est uniquement la vitesse. Afin de comparer les résultats présentés sur la figure 7.11 avec ceux issus de la littérature, une courbe de préférence de vitesse est construite pour la section interface. Dans ce but, le nombre d'entrées relatif à chaque incrément de vitesse positive a été rapporté à la valeur maximale de 169 entrées (Figure 7.12). Les points qui en

résultat sont représentés de manière superposée aux courbes de préférence produites en 2001 par Vismara & al (Figure 7.12). Cette référence contient entre autres, une série de courbes produites par différents auteurs pour la truite fario au stade juvénile (Figure 2.1). Les 2 courbes reproduites enveloppent l'ensemble de ces données. L'une est caractérisée par les indices de préférence maximaux et l'autre par les minimaux. Celle des indices maximaux a été établie par Raleigh & al, en 1986. Celle des indices minimaux a été établie en 1990 par Heggnes & al, dans une rivière norvégienne soumise à des éclusées. Elle est de ce fait la plus sévère et elle s'accorde bien aux points représentatifs des essais effectués dans le canal expérimental de la Maigrauge.

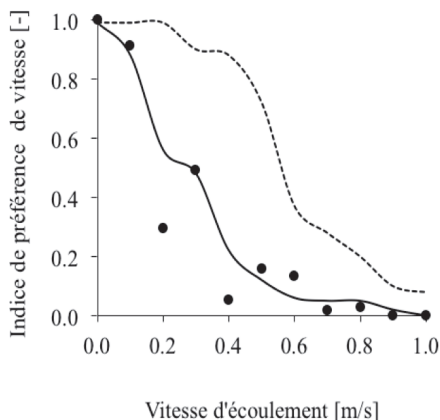


Figure 7.12: Courbes de préférence de vitesse pour la truite fario au stade juvénile : tirée de Vismara & al, établie par Raleigh & al (traitillé) ; tirée de Vismara & al, établie par Heggnes & al (trait continu) ; établie sur la base des vidéos de poissons et des mesures UVP faites dans le canal expérimental de la Maigrauge (points).

La figure 7.13 met en relation les points de la courbe de préférence de vitesse établie par Heggnes et ceux obtenus lors des essais de la Maigrauge. Elle montre une bonne correspondance des indices, puisque aussi bien la pente de la droite de régression que le coefficient de corrélation ont des valeurs très proches de 1. Cela montre que les résultats des essais effectués à la Maigrauge tiennent la comparaison avec des mesures faites en rivière.

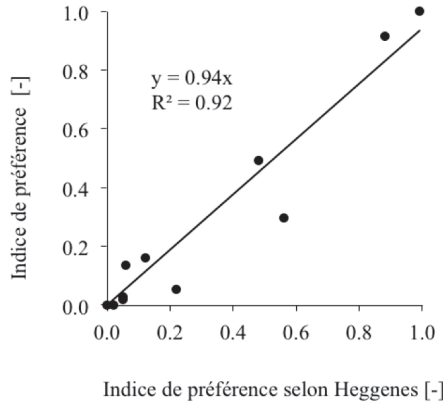


Figure 7.13: Indices de préférence de vitesse pour la truite fario au stade juvénile, valeurs résultant des essais menés dans le canal expérimental de la Maigrauge en comparaison de celle de Heggenes & al, tirées de Vismara & al (2001).

7.4.4 Distribution des passages dans le canal en aval du refuge

Par curiosité, une analyse comparable a été menée au droit de la section du canal située 0.75m en aval du refuge, pour les configurations C1 (Figure 7.14) et C4. Comme cela a été observé au cours des essais, les poissons s'approchent majoritairement du refuge en remontant le canal le long de la paroi droite, au voisinage de laquelle les vitesses sont inférieures à 0.3 m/s. Le point de cisaillement n'est pas visible sur le profil de vitesses du fait que le transducteur UVP restait trop éloigné de la paroi. Cependant, les observations effectuées lors des essais montraient bien des tourbillons dans la zone de décollement le long de la paroi droite en aval du refuge. Ces conclusions sont semblables à celles obtenues dans la section interface.

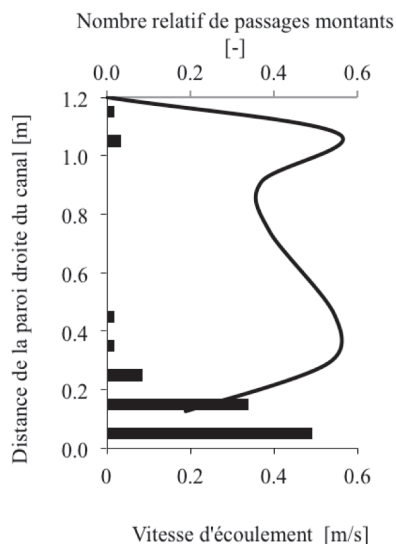


Figure 7.14: Configuration C1, section située à 0.75m en aval de la sortie du refuge. Profil horizontal des vitesses d'écoulement (ligne continue), à la profondeur 0.025m du fond, superposé à la distribution du nombre relatif de passages montants (batonnets).

7.5 Conclusions de l'analyse des résultats

7.5.1 Etude de corrélations

Le taux de présence des poissons dans le refuge est l'indicateur de performance représentatif des configurations testées. Des corrélations avec les paramètres géométriques du refuge ont tout d'abord été recherchées. Il en ressort que la longueur de pénétration de la paroi de dérivation dans l'écoulement du canal revêt une importance capitale. Elle doit être de 0.3m, soit 15% de la longueur de la ligne interface, pour maximiser le taux de présence. Concernant les autres paramètres géométriques, seule la variation de la longueur de la ligne interface située en amont de la paroi de dérivation influence significativement le taux de présence dans un sens inversement proportionnel, dans la limite des ordres de grandeurs testés. Les taux de présence les plus élevés, ceux des configurations C8, C3, C10 et C11, sont atteints quand cette longueur amont est comprise entre 0.6 et 0.8m, soit 30 à 40% de la longueur totale de la ligne interface. La variation des autres paramètres géométriques, tels que la longueur aval et l'angle d'orientation, n'influence pas le taux de présence. Concernant les paramètres hydrauliques, c'est le débit dérivé qui conditionne de manière explicite le taux de présence.

Le maximum est atteint quand ce débit équivaut à 22% de celui du canal principal. Les vitesses de pointe ne sont pas influentes. Il suffit que les valeurs maximale et minimale le long de la ligne interface soient de l'ordre de grandeur de la vitesse moyenne dans le canal.

7.5.2 Entrées des poissons dans le refuge

Il est ressorti du chapitre 5 que les poissons entrent majoritairement dans le refuge par la partie de la section interface située en aval de la paroi de dérivation. Il a aussi été montré que le nombre d'entrées de poissons était indépendant de leur taux de présence dans le refuge. La juxtaposition des distributions de vitesses d'écoulement et d'entrées de poissons le long de la ligne interface montre une préférence des poissons à entrer dans le refuge par la cellule de rotation attenante au couloir de circulation du débit dérivé. L'analyse globale des couples « nombre d'entrées/vitesse d'écoulement » autorise à conclure que les poissons recherchent des vitesses d'écoulement comprises entre 0 et 0.3 m/s orientées dans le sens opposé à celui de leur déplacement. L'importance du point de cisaillement et de la distribution des vitesses le long de la ligne interface est mise en évidence.

7.5.3 Critères de dimensionnement du refuge

Dans la perspective de la réalisation de refuges en rivières, des critères de dimensionnement peuvent être tirés de l'analyse des résultats. L'objectif essentiel est de dériver un débit dans le refuge qui soit de l'ordre de 22% du débit principal. Cette dérivation doit générer une distribution des vitesses d'écoulement le long de la ligne interface qui soit proportionnellement comparable à celle obtenue pour la configuration de référence. En particulier il est indispensable de préserver la position des points de cisaillement et des vitesses de pointe équivalentes à la vitesse moyenne dans le canal principal. Pour y parvenir, il est important que la longueur de pénétration de la paroi de dérivation dans l'écoulement du canal représente 15% de la longueur totale de la ligne interface, et que la longueur de la ligne interface située en amont de la paroi de dérivation soit de l'ordre de 30 à 40% de la longueur totale de cette même ligne. D'autres éléments de dimensionnement sont donnés au chapitre 8.

7.5.4 Configuration C8

Finalement, la configuration C8 est considérée comme la plus prometteuse. Elle produit le taux de présence maximum, et la forme en îlot de l'épi de dérivation offre d'autres avantages. En effet, l'épi de dérivation occupe une emprise qui lui donne de l'assise et par conséquent de la stabilité face à l'action des courants sur son pourtour. De plus, la plateforme qui le surmonte, est favorable à l'implantation de structures végétales. Par conséquent la configuration C8 est proposée car elle offre d'intéressantes possibilités de construction, d'intégration paysagère et de valorisation écologique.

8 INTERPRETATIONS, RECOMMANDATIONS

8.1 Bilan des informations acquises

8.1.1 Configurations

Les premiers essais avec des poissons se sont déroulés avec la configuration brute du refuge (Configuration C0, Figure 8.1), soit sans paroi de dérivation. L'attrait du refuge pour les poissons étant très limité et aléatoire, différentes variantes d'aménagement ont été examinées avant de découvrir l'intérêt et la simplicité d'installation d'une paroi de dérivation. Cet élément vertical plan, couvrant toute la hauteur d'eau, a été originellement positionné au centre de la section interface, avec une orientation perpendiculaire à l'axe du canal principal (Configuration C1, Figure 8.1). Il constitue un point d'arrêt pour la partie de l'écoulement qui longe la paroi latérale du canal principal, à l'approche du refuge. Le flux d'eau intercepté par la paroi de dérivation traverse le refuge en la contournant de manière forcée, pour générer à sa sortie le courant d'attrait pour les poissons en mouvement de montaison. Rappelons que ceux-ci sont placés en situation d'inconfort dans le canal principal où règne une vitesse moyenne de 0.79 m/s (Tableau 3.2), (Figure 2.1). La création de cette dynamique locale est probablement la contribution maîtresse de cette recherche.

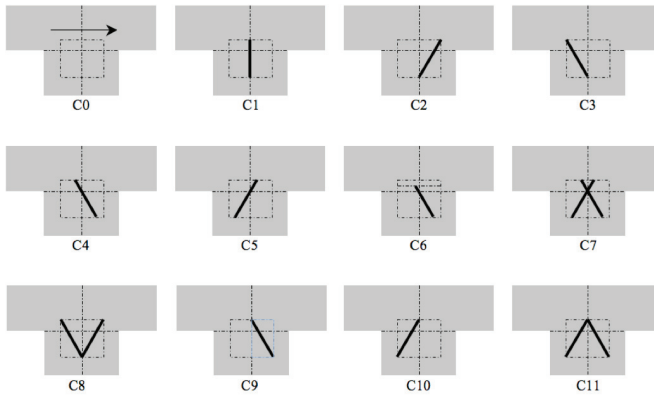


Figure 8.1: Représentation des 12 configurations relatives à la position et l'orientation de la paroi de dérivation dans le refuge. Le carré et les 2 axes tracés en filigrane servent de repaires à l'implantation.

Une fois le principe et l'efficacité de la paroi de dérivation validés, 10 autres configurations ont été générées (Configurations C2 à C11, Figure 8.1). Elles se distinguent par la position et l'orientation de la paroi de dérivation qui reste plane et verticale, le plan rectangulaire du refuge restant inchangé. La configuration C6 est marginalisée par une longueur de pénétration dans l'écoulement principal réduite à 0.15m alors que dans toutes les autres elle est maintenue à 0.30m. L'objectif de cette approche exploratoire était d'optimiser les conditions de circulation d'eau au droit et à l'intérieur du refuge pour maximiser sa fréquentation par les poissons.

8.1.2 Débits dérivés à travers le refuge

L'une des possibilités offertes par la simulation numérique avec BASEMENT 2D est la production de champs de vitesses d'écoulement moyennées sur la hauteur. Le profil tracé le long de la ligne interface permet ainsi de calculer le débit qui circule dans le refuge. Le débit dérivé est obtenu par l'intégration du profil de vitesses sur la ligne interface située en amont de la paroi de dérivation. C'est le débit qui entre dans le refuge. De la même manière, le débit sortant est calculé sur l'interface aval, à titre de vérification puisqu'il est par définition égal au débit entrant.

La comparaison des résultats (Figure 8.2) permet de remarquer que le débit dérivé est influencé de manière dominante par l'angle d'orientation de la paroi de dérivation et la longueur de la section interface située en amont de celle-ci. En prenant arbitrairement pour seuil la valeur de 40 l/s, soit 18% du débit total dans le canal, il apparaît que toutes les configurations dont l'angle d'orientation de la paroi est de 120° produisent un débit dérivé inférieur (Configurations C2, C5, C7, C10 et C11). Par ailleurs, les configurations dont la paroi de dérivation est orientée à 60° se distinguent par un débit décroissant avec l'augmentation de la longueur de la section amont (Configurations C3, C8, C4, C9 et C6, dans l'ordre décroissant du débit dérivé). La configuration C8 se différencie de C3 par une section de sortie plus étroite. La configuration C6 se démarque par un débit dérivé très faible, montrant bien l'influence de la longueur de pénétration de la paroi de dérivation dans l'écoulement principal. Il sera retenu pour la suite que les configurations C1, C3, C4 et C8 donnent les débits dérivés les plus importants.

Face au risque d'ensablement du refuge latéral il y a lieu de relever l'importance du débit dérivé pour le transit des sédiments en suspension à travers le refuge.

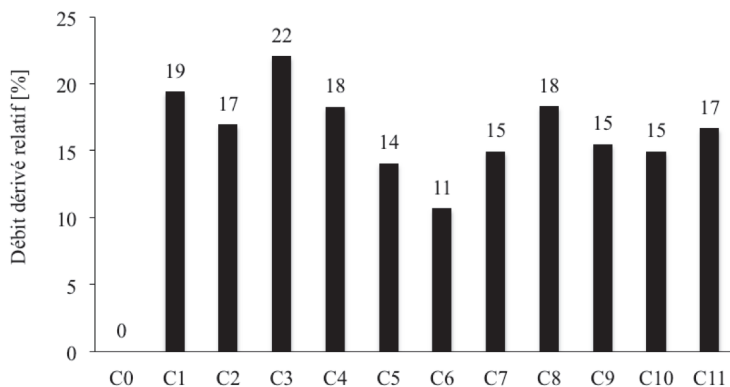


Figure 8.2: Débit dérivé dans le refuge, rapporté au débit de 220 l/s dans le canal expérimental, pour chaque configuration testée.

8.1.3 Vitesses d'écoulement à l'interface entre le refuge et le canal

Dans le cadre des mesures de vitesses UVP (Ultrasonic Doppler Velocity Profiler), la configuration C6 n'a pas été examinée. Elle se différencie par une longueur de pénétration écourtée de la paroi de dérivation dans l'écoulement du canal, raison pour laquelle sa comparaison avec les autres configurations a été jugée équivoque. Concernant la configuration C0, le débit dérivé étant quasi nul, les vitesses maximale et minimale ont été admises nulles elles aussi. D'autre part, la profondeur de nage des poissons ayant été fixée à 0.025m du fond, seules les vitesses correspondantes sont retenues pour la comparaison (Figure 8.3).

Les vitesses minimales sont les valeurs de pointe observées dans la partie amont de la section interface, à proximité de la paroi de dérivation. Elles se répartissent autour d'une moyenne de -0.67 m/s avec un écart-type de 0.20 m/s. Les configurations C1, C3, C4, C8, C10 et C11 présentent les valeurs les plus basses.

Les vitesses maximales sont les valeurs de pointe observées dans la partie aval de la section interface, le long de la paroi de sortie du refuge. Elles se répartissent autour d'une moyenne de 0.80 m/s, soit 100% de la vitesse moyenne dans le canal, avec un écart-type de 0.29 m/s (37%). Les configurations C5, C7 et C11 donnent les valeurs les plus élevées. Les configurations C3 et C4 se caractérisent par les valeurs les plus faibles, alors que les configurations restantes s'approchent de la moyenne.

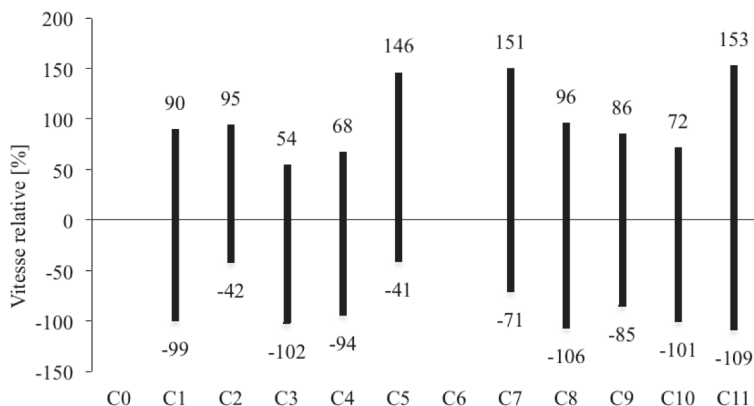


Figure 8.3: Vitesses maximales et minimales le long de la section interface, à la profondeur $z=0.025m$ du fond, rapportées à la vitesse moyenne de 0.79 m/s dans le canal, pour chaque configuration sauf C0 et C6. Les valeurs positives/négatives indiquent que le courant sort/entre dans le refuge.

8.1.4 Fréquentation du refuge par les poissons

Les essais avec les poissons ont été conduits avec des groupes d'une vingtaine de truites fario sauvages, au stade juvénile. Chaque configuration a été testée 3 fois avec successivement 10, 10 et 20 poissons. L'effectif a pu varier de ± 2 poissons selon les essais. Chaque essai durait 3 heures. Un relevé de la position des poissons était effectué toutes les 20 minutes. Le total des individus observés dans le refuge à chaque relevé, est moyenné sur la durée de chaque essai, puis rapporté au nombre de poissons en jeu. Les valeurs respectives sont finalement moyennées sur les 3 essais de chaque configuration, pour obtenir le taux de présence moyen de poissons dans le refuge. Cette valeur est explicitement mentionnée sur la figure 8.4, où apparaissent aussi les maxima et minima aux extrémités des traits verticaux. Dans l'ordre décroissant des taux moyens, apparaissent les configurations C8, C3, C10, C4 qui ont des valeurs supérieures ou égales à 80%.

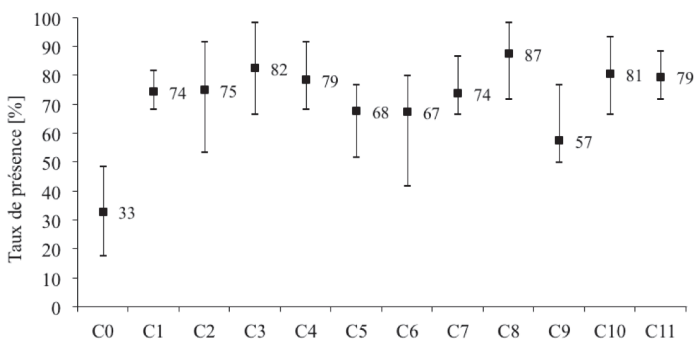


Figure 8.4: Taux de présence des poissons dans le refuge, moyenné sur les 3 essais effectués pour chaque configuration, valeurs maximales, minimales et ■ moyennes, avec mention de la valeur moyenne

8.1.5 Entrées des poissons dans le refuge

Durant les essais, le déplacement des poissons a été filmé dans le secteur du refuge. Le traitement d'images a ensuite permis de compter le nombre d'entrées dans le refuge (Chapitre 5.3.2) et d'établir leur répartition le long de la ligne interface. Globalement, il a été clairement observé que, de manière dominante, les poissons entrent dans le refuge par la partie de la section interface située en aval de la paroi de dérivation. Toutes configurations confondues, C0 exclue, la moyenne du taux d'entrées par l'aval est de 88%, pour un écart-type de 8%. Ce constat ne doit pourtant pas dissimuler l'intérêt que présentent les entrées par l'amont. Autrement dit, à taux de présence équivalents il serait judicieux de favoriser une solution caractérisée par un taux supérieur d'entrées par l'amont.

Par superposition des distributions d'entrées de poissons et de vitesses d'écoulement le long de la section interface, il a pu être démontré que les poissons choisissent de passer là où les vitesses sont comprises entre 0 et 0.3 m/s (0 à 38% de la vitesse moyenne dans le canal). Les secteurs concernés coïncident avec les cellules de rotation attenantes aux pointes des profils de vitesses et incluent le point de cisaillement des vitesses.

8.2 Paramètres significatifs pour le projet de refuges en rivière

8.2.1 Importance du débit dérivé et de la longueur amont

La réponse attendue de cette recherche n'est pas uniquement de désigner la meilleure configuration pour la reproduire en toute conformité. En effet, un bon nombre de questions

relatives à la faisabilité, à la pérennité et à l'intégration du refuge dans la berge d'une rivière restent à résoudre. Il est dès lors important de différencier les éléments dominants, voire contraignants, de ceux qui n'influencent pas de manière prépondérante l'attractivité du refuge.

Compte tenu de son influence avérée sur le taux de présence des poissons, le débit dérivé peut être reconnu comme un paramètre moteur de l'attractivité du refuge. L'interprétation faite au chapitre 7.2.3 à ce sujet, permet de conclure que le taux de présence de truites fario juvéniles dans le refuge, tel qu'il se présente sur le canal expérimental de la Maigrauge, peut dépasser 80% lorsque le débit dérivé est compris entre 15 et 22 % du débit d'éclusee dans le canal, qui est de 220 l/s.

Même si le débit dérivé est considéré comme un paramètre indépendant en regard du taux de présence, il est la conséquence de la géométrie du refuge et de l'orientation de la paroi de dérivation. D'une part cette géométrie conditionne sa grandeur, d'autre part, elle produit la diversité des vitesses d'écoulement (Figure 4.7) par le guidage du flux.

Dans le cadre de la recherche de corrélations entre le taux de présence et les paramètres géométriques du refuge, la longueur d'entrée est apparue comme déterminante. Selon la figure 8.3, le maximum est atteint pour une longueur libre de 0.6m, soit 30% en valeur relative. Considérant le seuil d'appréciation donné par la valeur moyenne du taux de présence, la longueur d'ouverture peut être étendue à 0.8m soit 40% de la longueur totale de la ligne interface.

Il ne paraît toutefois pas suffisant de s'en tenir à cette seule longueur amont pour maximiser le débit dérivé. En effet l'examen du tableau 7.1 montre, qu'à grandeur égale, il varie non seulement en fonction de l'angle d'orientation de la paroi de dérivation mais aussi en fonction de sa longueur de pénétration dans la section du canal principal. En l'occurrence, il apparaît clairement que les plus grands débits sont obtenus quand cet angle est inférieur ou égal à 90°, pour une longueur de pénétration de 0.30m (15% en valeur relative), ceci dans l'intervalle de la longueur d'entrée comprise entre 0.6 et 0.8m (30 à 40% en valeur relative). Ces 3 paramètres apparaissent donc comme liés pour l'obtention d'un débit de dérivation optimum, c'est à dire celui qui occasionne le taux de présence maximum.

8.2.2 Importance de la géométrie du refuge

Il a été clairement démontré que l'admission des poissons dans le refuge a lieu majoritairement par la partie de la section interface située en aval de la paroi de dérivation. Le long de cette section les vitesses d'écoulement sont très élevées dans le prolongement de la paroi de sortie du refuge. Puis elles diminuent fortement avec l'éloignement transversal, pour tendre vers zéro à l'approche de la paroi de dérivation (Figure 7.1). Les poissons franchissent

la ligne interface dans la cellule de rotation située entre le couloir de circulation du débit dérivé et le dos de la paroi de dérivation. Il est également reconnu qu'avant d'entrer dans le refuge, les poissons se mettent en position d'attente dans la zone de décollement située contre la paroi latérale du canal principal, juste en aval de l'angle de sortie du refuge.

Ce bref descriptif permet de rappeler que les paramètres discutés précédemment ne suffisent pas à eux seuls, à expliquer les conditions d'attrait du refuge pour le poisson. En effet, 2 éléments géométriques peuvent être considérés comme déterminants pour le fonctionnement du dispositif, à savoir la longueur de pénétration de la paroi de dérivation, et l'orientation de la paroi de sortie du refuge. Il convient tout d'abord de remarquer le second rôle de la partie saillante de la paroi de dérivation dans la section d'écoulement du canal, le premier étant le prélèvement du débit dérivé. La présence de cet obstacle provoque une déportation du flux subsistant dans le canal et un dégagement de la zone d'admission des poissons dans le refuge en aval de la paroi de dérivation. La longueur de pénétration est donc un élément déterminant pour le fonctionnement du refuge. La comparaison visuelle des champs de vitesses des configurations C4 et C6 suffit pour se convaincre (Figure 8.5).

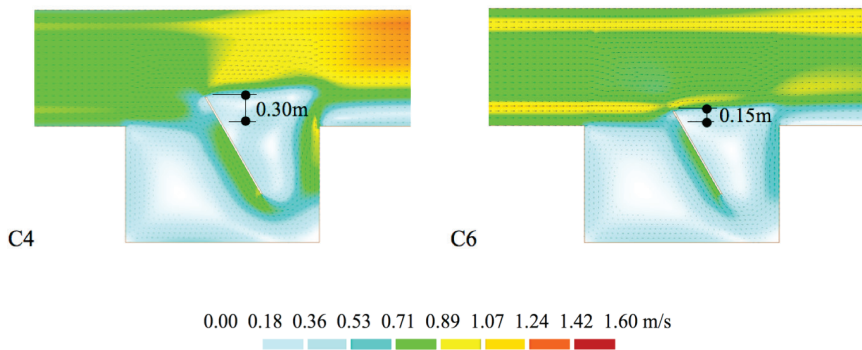


Figure 8.5: Champs de vitesses simulés avec Basement 2D, pour les configurations C4 et C6. La paroi de dérivation est positionnée de la même façon à la différence que la longueur de pénétration est de 0.30m pour C4 et 0.15m pour C6.

L'autre élément important est l'angle d'orientation de la paroi de sortie (Figure 8.6) qui doit être de 90° en référence à l'axe du canal. Ainsi positionnée, cette paroi guide le flux dans son prolongement, soit perpendiculairement à la direction de l'écoulement du canal. Cela occasionne d'une part le décollement nécessaire à la formation de la zone d'accalmie située derrière l'angle de sortie du refuge, et constitue d'autre part le signal d'attrait pour le poisson, tel le courant d'appel à l'entrée d'une échelle à poissons.

En réalité, ces 2 particularités géométriques de première importance sont liées entre elles. De par sa présence et son orientation, la paroi de sortie du refuge conditionne fortement le champ de vitesses à cet endroit, effet qui est lui-même dépendant de l'importance du débit dérivé et du dégagement du flux principal du canal dans le sillage de la paroi de dérivation.

8.2.3 Eléments pour le projet du refuge

Les paramètres caractéristiques du refuge ainsi que les ordres de grandeurs à respecter sont rassemblés dans le tableau 8.1. Les éléments structuraux du refuge qui s'imposent pour le dimensionnement sont les parois évoquées ci-dessus, à savoir la paroi de dérivation du moins son parement amont, ainsi que celle de sortie du refuge. Conformément à la situation qui prévaut dans le canal expérimental, il est utile que les faces inférieures de ces parois soient aménagées avec une pente aussi raide que possible, sur la partie en contact avec les écoulements. Il est aussi important de marquer les angles d'entrée et de sortie du refuge (Figure 8.6).

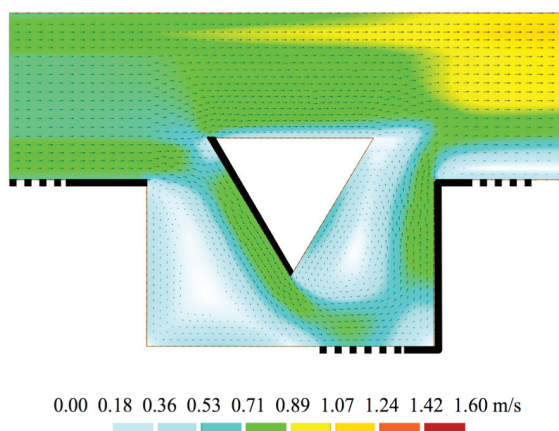


Figure 8.6: *Eléments architecturaux à respecter pour la construction du refuge, sur la hauteur de marnage en cas d'écluse. En gras, les parois à réaliser de manière plane et verticale dans la partie basse de l'écoulement (env. 40% de la hauteur d'eau en écluse), arêtes et angles à réaliser de manière vive et verticale. Le pointillé indique la transition vers la paroi plane et verticale.*

Pour le maintien dans le canal des alluvions transportées par charriage, il est recommandé de surélever le fond du refuge par rapport à celui de la rivière, tout en veillant à ce que ce fond reste immergé durant les périodes de basses eaux. Ceci dit, la question de la pérennité du refuge en regard du transport solide reste à examiner de manière approfondie.

8.3 Critères de transposition du refuge expérimental en rivière

8.3.1 Problématique de la transposition en rivière

Le refuge testé dans le canal de la Maigrauge possède un caractère expérimental. Bien que des éléments architecturaux et dimensionnels soient donnés, certains points restent à examiner avant sa mise en application en rivière. Parmi ceux-ci, il convient de citer, le transport solide et le comportement du refuge en cas de crue, ainsi que l'attractivité du refuge pour d'autres espèces de poissons, respectivement d'autres stades de développement. Raisons pour lesquelles dès le départ, cette recherche a été considérée comme la base scientifique d'un programme qui doit se poursuivre par des expérimentations en laboratoire et en rivière. Il en sera question au chapitre 9. Avant cela, des réflexions sont à mener pour la définition de critères de transposition in situ des dimensions et formes du refuge.

Dans ce but, la géométrie du refuge est référée à la longueur de la ligne interface, qui vaut 2.0m sur le canal de la Maigrauge. Cette longueur constitue l'étalon de l'ensemble du dispositif. De ce fait, le refuge unitaire a les dimensions du refuge expérimental divisées par 2.0m. Elles sont donc adimensionnelles (Tableau 8.1).

Se référant à la longueur caractéristique du refuge, soit celle de la ligne interface, l'objectif est d'émettre un critère de proportionnalité qui permette de dimensionner le refuge en fonction de la taille du cours d'eau, représentée par sa demi-largeur (Figure 8.7). De même, une détermination doit avoir lieu au sujet de l'intervalle d'implantation de refuges.

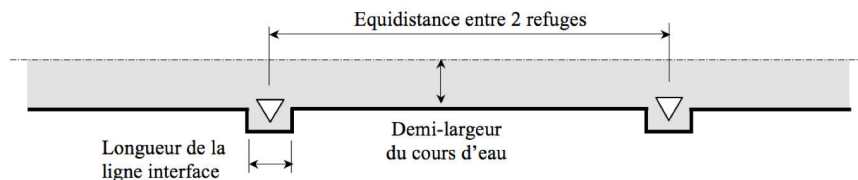


Figure 8.7: Dimensions de référence pour l'insertion de refuges dans la berge d'un cours d'eau.

8.3.2 Hypothèses pour déterminer la grandeur du refuge

Il a été relevé au chapitre 4.2.2 que la largeur du canal de la Maigrauge ne représentait que la rive droite d'un canal de plus grande largeur, par ailleurs indéterminée. Cette restriction, nécessaire au confinement des expériences dans un canal de dimensions limitées, est admissible pour réaliser des essais avec des poissons dès lors que leur retraite le long de la berge en cas d'écluesées est reconnue (voir chapitre 2.4.5). Implicitement ce mécanisme de

retrait est activé par la distribution transversale des vitesses d'écoulement. En effet, le poisson soumis à de trop fortes vitesses au milieu de la rivière en cas d'éclusées, se rapproche progressivement de la berge dans sa recherche instinctive de vitesses d'écoulement proches de sa vitesse de croisière. Dès lors, il se retrouve dans une bande de l'écoulement attenante à la berge, dans laquelle il doit pouvoir percevoir la présence d'un refuge. Pour ce faire l'emprise de la perturbation du champ de vitesses occasionnée par le refuge doit avoir une largeur comparable à celle de cette zone d'écoulement vers laquelle les poissons convergent. Or, la largeur du champ perturbé est elle-même dépendante de la taille du refuge. Ainsi l'établissement d'un lien entre la taille du refuge et la largeur du cours d'eau est envisageable. La question est maintenant de quantifier la largeur de cette zone d'influence le long de la berge.

Concernant la largeur de la bande d'écoulement du canal perturbée par la présence du refuge et de sa paroi de dérivation, elle est estimée à partir des champs de vitesses simulés avec BASEMENT 2D (Figures 4.8 et 4.9). Pour ce faire, la configuration C1 est intéressante car elle est documentée par des profils de vitesses UVP dans une section du canal située en aval du refuge. Sur la figure 6.23, cette largeur peut être estimée à au moins 1m, ce qui équivaut à la moitié de la longueur de la ligne interface. Concernant la correspondance entre cette largeur influencée par la présence du refuge et celle dans laquelle se rassemblent les poissons, différentes hypothèses sont envisageables.

La 1^{ère} hypothèse consiste à confondre cette valeur de 1m avec la demi-largeur du cours d'eau. Cela revient à dire que la présence du refuge doit être signalée aux poissons jusqu'au milieu de la rivière. Dans ce cas, la largeur du cours d'eau est égale à celle de la ligne interface. S'intéressant à des implantations de refuge long de rivières dont la largeur du lit est de l'ordre de 10m, cela donne une superficie théorique et donc minimale du refuge, de 10m x 6m. Il s'agit donc de gros ouvrages en regard de la taille de la rivière, avec des interférences en termes de transport solide et d'intégration à examiner. En particulier, il convient de prêter attention à l'impact de la contraction produite par la pénétration de la paroi de dérivation dans la section d'écoulement de la rivière. A cet égard il est souhaitable que deux refuges ne soient pas placés en regard l'un de l'autre sur chaque berge. La disposition alternée gauche-droite à mi-distance est préconisée.

La 2^{ème} hypothèse consiste à exploiter l'instinct du poisson à s'approcher du bord. Le poisson s'éloigne d'abord du milieu de la rivière. Puis il est informé de l'existence du refuge. Dans ce cas la présence du refuge n'a besoin d'être signalée que sur une largeur limitée du lit de la rivière. Cette largeur peut être estimée en référence à la notion de couche limite. Dans le plan vertical, son épaisseur est estimée à 20% environ de la hauteur d'eau pour un écoulement turbulent hydrauliquement rugueux (Graf & al, 1993). Par transposition dans le plan horizontal elle peut être assimilée à 20% de la demi-largeur. Pour une rivière de 10m de large,

cela revient à préconiser un refuge aux mêmes dimensions que celui testé à la Maigrauge, c'est à dire très petit. En situation réelle, de si petites dimensions ne semblent pas compatibles avec la pérennité de tels aménagements. En effet, il faut redouter des obstructions et l'ensablement.

8.3.3 Conditions pour le dimensionnement du refuge

Les conditions extrêmes obtenues à partir de ces 2 hypothèses sont mises en évidence. C'est donc vraisemblablement dans cet intervalle que se trouve l'optimum. Des hypothèses intermédiaires pourraient ainsi être émises. Par exemple, un prolongement peut être donné à la notion de couche limite, considérant que la vitesse moyenne dans un profil vertical est rencontrée à une position correspondant à 40% de la hauteur d'eau. Par transposition dans le plan horizontal, cette proportion peut être appliquée à la demi-largeur du cours d'eau. Pour une rivière de 10m de large, cela revient à préconiser une longueur de la ligne interface de 8m. Les résultats obtenus sur la base de ces différentes hypothèses sont rassemblés dans le tableau 8.1. Ils montrent que le compromis est à trouver par conciliation des contraintes de projet en jeu. Cette indétermination montre surtout la nécessité de procéder à des expérimentations en rivière et préalablement en canal expérimental.

Paramètres géométriques du refuge		Canal Maigrauge	Rapport des longueurs 3)	1	Hypothèses Intermédiaire	2
Largeur de la rivière	m			10.0	10.0	10.0
Largeur d'influence	m	1.0	50%	5.0	4.0	2.0
Proportion 1)				100%	80%	20%
Longueur de la ligne interface	m	2.0	100%	10.0	8.0	2.0
Longueur de pénétration	m	0.3	15%	1.5	1.2	0.3
Largeur du refuge	m	1.2	60%	6.0	4.8	1.2
Surface brute du refuge	m ²	2.4		60.0	38.4	2.4
Densité dans le refuge 2)	indiv/m ²			10	10	10
Capacité d'accueil	individus			600	384	24
Densité dans la rivière 2)	indiv/m ²			0.2	0.2	0.2
Equidistance entre refuges	m			300	172	12

Tableau 8.1: Données caractéristiques et exemples de dimensionnement de refuges. 1) Rapport entre la largeur d'influence et la demi-largeur de la rivière. 2) Densité de poissons. 3) Longueurs rapportées à la longueur totale de la ligne interface.

S'agissant par la suite de produire des recommandations pour la réalisation de prototypes en rivière, les valeurs obtenues en application de la 1^{ère} hypothèse sont proposées comme grandeurs minimales. Ceci dit, le modelage du refuge doit être effectué à l'aide de simulations numériques. L'objectif prioritaire est de dériver dans le refuge le débit relatif qui produit des conditions d'attrait comparables à celles produites dans le canal expérimental. Il s'agit en particulier de reproduire le long de la ligne interface, un profil de vitesses relatives similaire ainsi qu'un signal d'attrait perceptible à l'aval. Dans le cadre des essais menés à la Maigrauge, la vitesse de pointe à la sortie du refuge était de l'ordre de la vitesse moyenne dans le canal. Une valeur limite de cette vitesse doit cependant être prise en considération. En référence aux conditions d'attrait des échelles à poissons, il est admis que la vitesse optimale pour les salmonidés et les grands migrateurs à la sortie d'eau est de l'ordre de 2.0-2.5 m/s (Larinier & al, 1998). Cette valeur ne devrait en aucun cas être dépassée.

Une autre condition limite est imposée par les risques d'obstruction. En effet, la présence de refuges constitue une discontinuité des berges est sujette à l'interception des bois flottants. Afin de se prémunir contre ce problème des dimensions généreuses s'imposent. La proposition faite est de construire des ouvrages dont la longueur d'entrée, respectivement de sortie du refuge, soit supérieure ou égale à 2.5m. Appliquée à la configuration C8, cela équivaut à une longueur minimale de la ligne interface d'au moins 8m. En correspondance, les dimensions minimales du refuge sont celles qui figurent en hypothèse intermédiaire sur le tableau 8.1. S'agissant de valeurs minimales, elles sont indépendantes de la largeur de la rivière. Autrement dit, quelle que soit l'hypothèse adoptée sur la proportion de la largeur d'influence sur la largeur du cours d'eau, la longueur de la ligne interface ne devrait pas être inférieure à ces 8.0m.

8.3.4 Equidistance entre refuges selon la densité de poissons

La proposition faite ci-dessus est d'établir la grandeur du refuge à partir de la largeur de la rivière, proportionnellement aux dimensions du canal expérimental de la Maigrauge. La distance entre 2 refuges découle en partie de cette grandeur. En effet, la surface en plan du refuge définit sa capacité d'accueil. Pour le dimensionnement du canal expérimental de la Maigrauge, il a été admis une densité de 1 à 2 individus par m² et 5 à 10 individus par m² dans le refuge. A comparer avec les données de la littérature (Schager & al, 2007) ces densités sont très élevées car un ordre de grandeur 0.1 à 0.2 individus par m² dans le cours d'eau serait encore normal. La densité de poissons dans la rivière est donc une donnée du projet, qui doit être définie de cas en cas. A l'opposé, par souci de rationalité, il convient de maximiser cette densité dans le refuge. C'est pourquoi, il paraît acceptable d'admettre 5 à 10 individus par m², pour un séjour intermittent dans le refuge. Reprenons l'exemple d'une rivière de 10m de largeur, avec une bande d'influence du refuge représentant 20% à 100% de la demi-largeur du lit (tableau 8.1). En admettant une densité de 10 poissons par m² pour le refuge et 0.2

poissons par m^2 dans la rivière, la distance qui sépare 2 refuges varie de 12 à 300m. Ces chiffres peuvent encore varier du simple au double selon la densité admise. Il est donc évident que la grandeur du refuge est associée au nombre qu'il convient d'en réaliser par unité de longueur de la rivière. Cette approche donne les premiers ordres de grandeur de l'équidistance de refuges expérimentaux à réaliser en rivière. Il faut toutefois tenir compte du fait qu'en réalité la densité de poissons diminue avec la taille de la rivière (Schager & al, 2007) et que bien d'autres aspects restent à maîtriser dans une rivière soumise aux éclusées pour retrouver une densité originelle, en particulier la reconstitution des habitats aquatiques. Il n'est donc pas si simple d'établir des règles d'implantation de refuges sans procéder à des investigations circonstanciées, d'ordre biologique, ainsi que des essais en rivière.

8.3.5 Equidistance selon la capacité de nage des poissons et selon le temps de montée de l'écluse

Une autre condition importante est imposée par la capacité de nage des poissons. En effet, pour que les refuges soient utiles, il faut que les poissons puissent les atteindre lorsqu'ils sont soumis au stress de l'écluse. Dans cette situation, le poisson qui remonte le courant doit fournir un effort supplémentaire croissant pour poursuivre son chemin malgré l'augmentation des vitesses d'écoulement auxquelles il est confronté. A mesure que le temps s'écoule, le poisson voit la vitesse de son mouvement ascendant se réduire, ce d'autant plus qu'il se fatigue. A l'extrême, sa vitesse de nage est atteinte puis dépassée par celle du courant au point qu'il est emporté vers l'aval. Ce schéma est à nuancer par le fait que l'individu se sera progressivement retranché vers les berges où les vitesses d'écoulement sont réduites. Quoi qu'il en soit, ce raisonnement montre que le poisson dispose d'un temps limité pour rejoindre un refuge. Durant la montée de l'écluse, l'accroissement du débit induit une augmentation des vitesses d'écoulement, y compris à proximité des berges. Il faut donc que le poisson trouve refuge pendant que sa vitesse de croisière est supérieure à celle du courant qu'il affronte. Dans une étude de cas (Beffa, 2010) qui se référait à un temps de montée de l'écluse de 2h30, il a été calculé que la vitesse d'écoulement le long des berges atteignait la vitesse de croisière du poisson après 30 minutes. Considérant que la vitesse relative de nage du poisson était en moyenne de 0.2 m/s sur cette durée, l'équidistance entre les refuges a été estimée à 240m en appliquant un coefficient de réserve de 1.5. Si le temps de montée de l'écluse est écourté, l'équidistance est réduite. Bien que tiré d'un exemple, ce résultat tombe dans l'intervalle des équidistances défini en considérant la densité de poissons.

8.4 Recommandations pour l'implantation de refuges en rivière

Les réflexions menées au cours de ce chapitre ont fait apparaître des ordres de grandeur, des critères et conditions, pour la réalisation de prototypes de refuges en rivière, dont un résumé est produit ci-après.

- . La configuration C8 est la plus prometteuse car elle concilie plusieurs intérêts. Elle donne le taux de fréquentation maximum, et la forme de l'épi de dérivation est favorable du point de vue de la construction, de l'intégration paysagère et de la valorisation écologique. C'est pourquoi elle est recommandée comme forme de base pour le refuge.

- . D'un point de vue constructif, il est essentiel de reproduire fidèlement la structure des écoulements dans le refuge, et en particulier le profil de vitesses dans la section interface. Pour y parvenir, il est nécessaire d'implanter avec conformité les parois qui guident le débit dérivé dans le refuge.

- . Il est utile que le parement de la face amont de l'épi et de la paroi de sortie du refuge, soit façonné avec une pente aussi raide que possible du moins sur une hauteur en contact avec les écoulements en situation d'écusée. Il est recommandé de réaliser ces parties d'ouvrage avec des rangs de blocs d'enrochement, ($\text{volume} \geq 0.6 \text{ m}^3$). Les autres faces et la partie supérieure des 2 parois susmentionnées peuvent prendre une pente de talus naturel. Pour ombrager le refuge, ces parties seront végétalisées.

- . Pour le transit des alluvions, une surélévation de l'ordre de 0.5 à 1.0m entre le fond du refuge par rapport au lit du cours d'eau est nécessaire. Cette dénivellation sera marquée par un seuil en enrochement à l'interface entre le refuge et le canal, de part et d'autre de l'épi de dérivation. Afin de préserver les habitats, un niveau d'eau minimum de 0.5m sera maintenu dans le refuge, en l'absence d'écusée.

- . Pour se prémunir contre les risques d'obstruction par des bois transportés, la longueur de la ligne interface devrait être plus grande ou égale à 10m. De ce fait, les dimensions minimales du refuge sont fixées en proportion des dimensions du refuge aménagé pour les essais dans le canal expérimental de la Maigrauge. Pour les autres cas, une règle de proportionnalité est à établir entre la longueur de la ligne interface et la largeur de la rivière, sur la base des hypothèses émises.

- . Concernant l'équidistance entre les refuges, ce paramètre est dépendant de la densité de poissons dans la rivière et du temps de montée de l'écusée, et de fait du site examiné. Les grandeurs adaptées à la situation sont à définir de cas en cas. Quoi qu'il en soit, les refuges seront disposés de manière alternée entre les 2 berges, en évitant les zones d'alluvionnement.

Il ressort de cet aperçu que les 2 paramètres déterminants que sont la taille du refuge en rapport de la largeur de la rivière, ainsi que l'équidistance entre les refuges sont à tester par des essais sur des prototypes, dont une esquisse est donnée par la figure 8.8. Des indications complémentaires sont produites au chapitre 9.

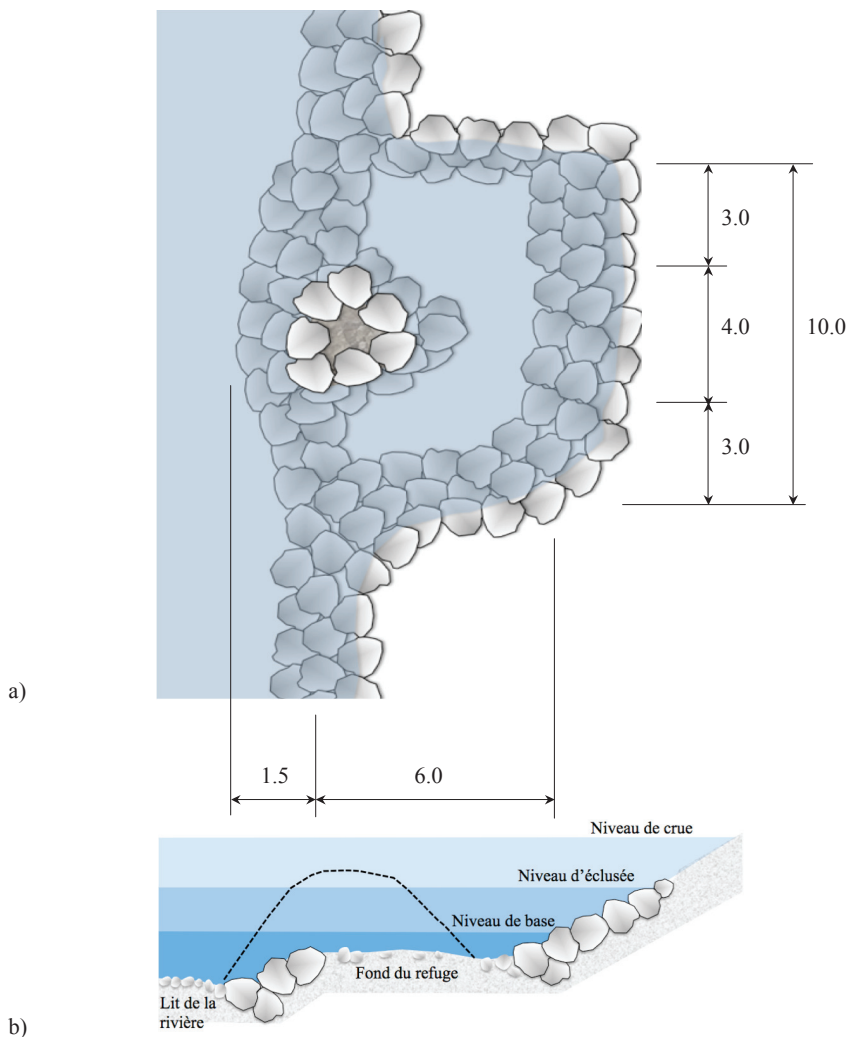


Figure 8.8: Esquisse pour le projet de prototype de refuge avec des dimensions minimales indicatives [m] : a) Vue en plan, b) Profil transversal.

9 BILAN, PERSPECTIVES, CONCLUSIONS

9.1 Bilan de la recherche

L'objectif scientifique de ce travail de doctorat, était d'étudier de manière fine et approfondie les situations hydrodynamiques par lesquelles les poissons sont attirés vers un refuge latéral. Les essais ont été effectués pour 12 configurations qui se distinguent par la forme, la position et l'orientation de l'épi de dérivation. Il en est ressorti une bonne diversité des champs de vitesses d'écoulement. Avec la configuration C8, le taux de présence de poissons dans le refuge atteint 87%. Il s'agit d'une moyenne sur 9 heures d'essais. Cette configuration est constituée d'un îlot en forme de triangle équilatéral dont le sommet est dans le refuge.

Répondant à l'objectif technique de cette étude, des bases de dimensionnement et de projet de refuges ainsi que des recommandations de mise en œuvre sont produites, en vue de la réalisation de prototypes. Dans ce cadre, la configuration C8 est proposée comme référence.

Du point de vue méthodologique, cette recherche est particulière par la sollicitation de poissons pour le développement et l'optimisation d'un ouvrage, dans un canal expérimental. Du point de vue hydrodynamique elle se distingue par l'étude des échanges d'eau entre un courant principal et une niche latérale. A cette occasion, des comparaisons de valeurs et de distributions de vitesses d'écoulement sont faites entre différentes techniques de mesures et des simulations.

9.2 Recherches futures

Plusieurs questions nécessitent de poursuivre la recherche sur ce sujet. Celles qui demandent un approfondissement scientifique sont à traiter par des essais en laboratoire, et des simulations numériques. Celles qui sont de l'ordre de la validation et de la mise en conditions naturelles sont à réaliser en rivière. Concernant les études in situ, les indications et recommandations figurant au chapitre précédent, permettent d'aborder cette étape déterminante.

Concernant les expérimentations en laboratoire, elles concernent en premier lieu, l'étude du comportement d'autres poissons, à différents stades de croissance. Pour tester l'influence de la température de l'eau, les essais pourraient être étendus à la période hivernale. Dans ce cadre une étude systématique de la profondeur de nage des poissons enrichirait les connaissances. Dans ce sens, des tests de détection de la position des poissons dans le plan vertical par l'interprétation de signaux ultrasons devraient être effectués. De même, le

traitement des images vidéo disponibles devrait être élaboré pour la connaissance générale des trajectoires des poissons. En relation avec les objectifs de charriage, il serait judicieux d'examiner si le poisson entre toujours dans le refuge quand l'interface entre le refuge et le canal est aménagée en seuil incliné.

Du point de vue hydraulique, des essais sur modèle réduit et des simulations numériques s'imposent pour déterminer la fameuse largeur d'influence du refuge sur la largeur totale de la rivière. Ces opérations seraient menées à 2 échelles : celle du refuge comme élément isolé et celle de la rivière comme entité intégrant une série de refuges de part et d'autre du lit. En parallèle la problématique des transports solides reste à étudier de manière approfondie. En effet, l'ensablement est à craindre dans les zones mortes dans le refuge, de même que des affouillements le long des parois qui guident le débit dérivé. Le comportement en situation de crues submergeantes doit aussi être examiné pour fixer les hauteurs des éléments structuraux du refuge. De même la hauteur de dénivellation entre le fond du lit de la rivière et celui du refuge est à examiner en regard du maintien dans le cours d'eau principal, des alluvions transportées par charriage.

Un approfondissement est aussi requis au sujet des rivières susceptibles d'accueillir des refuges. Une identification en terme de morphologie et d'écologie est nécessaire, car il se peut que le refuge ne corresponde pas à tous les cas envisageables. La question est donc de préciser les situations optimales et les limites du domaine d'application des refuges. Cela peut dépendre de la largeur du lit, des vitesses d'écoulement, de la hauteur de marnage, des temps de montée et de descente des éclusées, des espèces de poissons prépondérantes, des densités de populations, etc. Dans ce cadre la question de l'équidistance entre les refuges pourra trouver réponse puisqu'elle dépend de la capacité de nage des poissons et de la densité des populations.

Intégrant l'ensemble de ces composantes ainsi que celles imposées par la construction et l'aménagement de ces ouvrages, une optimisation des formes constituerait la référence pour le projet de refuge en rivière.

9.3 Conclusions

Cette recherche constitue la partie expérimentale du développement de refuges à poissons en situation d'écluse. Elle montre tout d'abord que le refuge latéral avec un épi de dérivation est une mesure attractive pour le poisson menacé par de trop fortes vitesses d'écoulement. La position et l'orientation de cet épi permettent de nuancer la performance. Quelques éléments architecturaux sont à respecter et des règles de transposition sont édictées. Afin de valider les résultats de cette recherche, il est effectivement indispensable de les appliquer à un site

naturel : une rivière poissonneuse où la problématique des éclusées s'exprime principalement par des vitesses d'écoulement élevées. Il faut aussi que l'alimentation en eau soit garantie dans le refuge en périodes de basses eaux. Le dimensionnement du refuge doit alors faire l'objet d'un projet d'ingénierie qui respecte non seulement les contraintes définies par la présente recherche mais aussi celles liées aux aspects constructifs et d'intégration environnementale. Dans ce contexte, les formes pourront être optimisées par simulation numérique. Une étude de transport solide est aussi nécessaire pour garantir la pérennité de l'ouvrage. S'agissant d'un site expérimental des dispositions devront être prises pour procéder au suivi télémétrique des poissons et pour relever les vitesses dans la section interface. La proximité d'une station hydrométrique serait un atout pour la mesure en continu du débit. Dans l'idéal, la réalisation de plusieurs refuges s'impose. Cette phase n'est donc pas à considérer comme un simple contrôle de conformité. La sollicitation de plusieurs espèces de poissons à différents stades de croissance peut réserver des surprises, confirmant la nécessité d'un suivi scientifique. Au bout de ce processus, le produit sera opérationnel. Il permettra à cette contribution de trouver sa place parmi l'ensemble des mesures requises pour la restauration des habitats en rivières soumises aux éclusées.

Lausanne, le 16 septembre 2011

BIBLIOGRAPHIE

- Anderson R.M., Nehring R.B. (1985). Impacts of stream discharge on trout rearing habitat and trout recruitment in the South Platte river, Colorado. Proceedings of the symposium on small hydropower fisheries, may 1-3 1985, American Fisheries Society, Auraro, 59-64.
- Alfredsen K., Halleraker J. H., Heggenes J., and Saltveit S. J. (1999). Seasonal habitat use by Atlantic salmon and brown trout linked to hydraulic alteration in a Norwegian hydropeaking river.
- Almodovar A., Nicola G. (1999). Effects of a small hydropeaking station upon brown trout in the river Hoz Seca (Tagus basin, Spain) one year after regulation. *Regulated Rivers: Research & Management*, 15, 477-484.
- Arrignon J. (1998). Aménagement piscicole des eaux douces. Editions Technique & documentation. ISBN 2-7430-0241-7.
- Baglinière J.-L., Arribemoutounet D. (1985). Microdistribution of populations of brown trout (*Salmo trutta* L.) and of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and other species present in the upstream part of the Scorff River (Brittany). *Hydrobiologia* 120 : 229-39.
- Baran P., Delacoste M., Lascaux J.M., Belaud A. (1993). Relations entre les caractéristiques de l'habitat et les populations de truites communes (*Salmo trutta* L.) de la vallée de la Neste d'Aure. *Bulletin Français de Pêche et de Pisciculture*, 331: 321-340.
- Baran P., Delacoste M., Dauba F., Lascaux J.M., Belaud A. (1995). Effect of reduced flow on brown trout populations downstream dams in French Pyrenees. *Regulated Rivers : Research and Management*, 10 : p. 347-361.
- Baran P., Delacoste M., Lascaux J.-M. (1997) Variability of mesohabitat used by brown trout populations in the French central Pyrenees. *Transactions of the American Fisheries Society* 126 : 747-57.
- Bartz B. (1990). Sources of uncertainty and effect on interpretation of results in the development of instream flows for fisheries habitat. M. Sc. Thesis, Utah State University, Logan.
- Baumann P., Klaus I. (2003). Conséquences écologiques des éclusées, Etude bibliographique, Informations concernant la pêche n° 75, Office Fédérale de l'Environnement, OFEV, Berne, Suisse.

- Beach M.H. (1984). Fish pass design. Criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fishes in rivers. Fish Res.Tech. Rep. 78.
- Beall E., Marty C. (1986). Reproduction du saumon atlantique (*Salmo salar* L.), en milieu semi-naturel contrôlé. Bulletin Français de Pêche et de Pisciculture, 289 : 77-93.
- Beffa P. (2010). Etude de refuges à poissons aménagés dans les berges de rivières soumises aux éclusées, application sur la Sarine en aval du barrage de Schiffenen. Travail de Master, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).
- Beitinger T. L., Bennett W. A., McCauley R. W. (2000). Temperature tolerance of North American freshwater fishes exposed to dynamic changes in temperature. Environmental Biology of Fishes 58, 237-275.
- Bélanger M., El-Jabi N., Caissie D., Ashkar F., Ribi J.-M. (2005). Estimation de la température de l'eau en rivière en utilisant les réseaux neurones et la régression linéaire multiple. Rev. Sci. Eau 18/3 (2005) 403-421.
- Bélaud A., Chaverroche P., Lim P., Sabaton C. (1989). Probability-of-use curves applied to brown trout (*salmo trutta fario* L.) in rivers of Southern France. Regulated Rivers 3 : 321-326.
- Berg S., Jorgensen J. (1991). Stocking experiments with 0+ and 1+ trout parr, *Salmo trutta* L., of wild and hatchery origin : 1. Post-stocking mortality and smolt yield. Journal of Fish biology, 39, 151-169.
- Blaxter J.H.S. (1969).Swimming speeds of fish. FAO Fish. Rep., 62 (1) :69-100.
- Bone Q., Marshall N. B. (1985). Biologie der Fische. Gustav Fischer Verlag.
- Bouchard J.-P. (2004). La modélisation physique en hydrobiologie, conception des ouvrages de franchissement pour poissons migrateurs. La Houille Blanche 3/2004.
- Bovee K.D. (1978). Probability-of-use criteria for the family Salmonidae. Instream Flow Information Paper 4. US Fish and Wildlife Service FWS/OBS-78/07.
- Bovee K.D. (1982). A guide to stream habitat analysis using instream flow incremental methodology. Instream Flow Information Paper 12. US Fish and Wildlife Service, Fort Collins, Colorado, USA.
- Caissie D., El-Jabi N., Satish M.G. (2001).Modelling of maximum daily water temperatures in a small stream using air temperatures. Journal of Hydrology, 251 : 14-28.
- Caissie D. (2003). Stream water temperature modelling in forest catchments. PhD thesis, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia (2003).
- Caissie D. (2006). The thermal regime of rivers : A review. Freshwater Biol. 51, 1389-1406.

- Carlier M. (1972). *Hydraulique générale et appliquée*. Editions Eyrolles, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, ISSN 0399-4198.
- Champigneulle A., Escomel J. (1984). Marquage des salmonidés de petite taille par ablation de l'adipose ou des nageoires pelviennes. *Bull. Fr. Piscic.* 293-294, 52-58.
- Chaveroche P., Gras R., Sabaton C. (1987). Quinze experts analysent l'habitat de la truite fario. Note technique EDF, Direction des Etudes et Recherches.
- Cowx I.G., Welcomme R. L. (1998). Rehabilitation of rivers for fish. European Inland Fisheries Advisory Commission of the Food & Agriculture Organization, FAO, Roma, ISBN 92-5-104018-4.
- Crisp D. T., and Hurley M. A. (1991). Stream channel experiments on downstream movement of recently emerged trout, *Salmo trutta* L. and salmon, *S. salar* L.-I. Effect of four different water velocity treatments upon dispersal rate. *Journal of Fish Biology* 39-3.
- Cunjak R.A., Power G. (1986). Winter habitat utilization by stream resident brook trout (*Salvenius fontinalis*) and brown trout (*Salmo trutta*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 43:1970-1981.
- De Cesare G., Boillat J.-L. (2006). Flow velocity measurements using ultrasound Doppler method - 10 years experience in hydraulic modeling. Proceedings of the Fifth International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, 5th ISUD, 12-14 September 2006, ETH Zurich, Switzerland, ISBN: 3-905609-29-0, pp. 113-116.
- Deng Z., Richmond M.C., Guensch G.R., Mueller R.P. (2004). Study of fish response using particle image velocimetry and high-speed, high-resolution imaging. Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-14819.
- Eberstaller J., Pinka P. (2001). Trübung und Schwall Alpenrhein - Einfluss auf Substrat, Benthos, Fische, Teilbericht Fischökologie, Abteilung für Hydrobiologie, Fischereiwirtschaft und Aquakultur, Internationale Regierungskommission Alpenrhein Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie, Wien.
- Ehrenberg, J., and Steig, T. (2003). Improved techniques for studying the temporal and spatial behavior of fish in a fixed location. *Journal of Marine Science* 60, 700-706.
- Elliott J. M. (1994). *Quantitative ecology and the brown trout*. Oxford University Press, ISBN 0-19-854678-5.
- Faeh R., Rousselot P., Vetsch D., Volz C., Farshi D. (2008). System Manuals of BASEMENT, Version 1.4. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology - VAW. Swiss Federal Institute of Technology Zurich.

- Faeh R., Mueller R., Rousselot P., Vetsch D., Volz C., Vonwiller L., Veprek R., Farshi D. (2010). System Manuals of BASEMENT, Version 2.1. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology - VAW. Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- Fischnetz (2004). Sur la trace du déclin piscicole. Rapport final. EAWAG/OFEV.
- Flodmark L. E. W., Forseth T., L'Abe'e-Lund J. H., Vøllestad L. A. 2006. Behaviour and growth of juvenile brown trout exposed to fluctuating flow, Ecology of Freshwater Fish 2006: 15: 57–65.
- Fragnoud E. (1987). Préférence d'habitat de la truite fario en rivière (quelques cours d'eau du sud-est de la France). Doctorat Université Claude Bernard Lyon, CEMAGREF.
- Fujita I., Muste M., Kruger A. (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. Journal of Hydraulic Research. 36(3) : 397 – 413.
- Ginot V., Souchon Y., Capra H., Breil P., Valentin S. (1998). EVHA version 2.0. Evaluation des habitats physiques de poissons en rivière. Guide méthodologique.
- Gouraud V., Capra H., Sabaton C., Tissot L., Lim P., Vandewalle F., Fahrner G., Souchon Y. (2008). Long-term simulations of the dynamics of trout populations on river reaches bypassed by hydroelectric installations – Analysis of the impact of different hydrological scenarios, River. Res. Applic. 24:1185-1205.
- Graf W. H., Altinakar M. S. (1993). Hydraulique fluviale. Traité de génie civil, volume 16, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, ISBN 2-88074-261-7.
- Greenberg L.A. (1992). The effect of discharge and predation on habitat use by wild and hatchery brown trout (*Salmo trutta*). Regulated Rivers: Research & Management, 7: 205-212.
- Halleraker J.H., Saltveit S. J., Harby A., Arnekleiv J. V., Fjeldstad H.-P., Kohler B. (2003) Factors influencing stranding of wild juvenile brown trout (*Salmo trutta*) during rapid and frequent flow decreases in an artificial stream. River Research and Applications 19 : 589–603.
- Harby A., Fjeldstad H.P. (2002). Modelling fish habitat and migration improvements in two regulated rivers with environmental flows. Proceedings of the 4th International Symposium on Ecohydraulics, Cape Town, South Africa, March 3-8, 2002.
- Heggenes J., Traaen T. (1988). Downstream migration and critical water velocities in stream channels for fry of four salmonid species. Journal of Fish Biology 32-5.

- Heggenes J., Saltveit S. J. (1990). Seasonal and spatial microhabitat selection and segregation in young atlantic salmon and brown trout in a Norwegian river. *Journal of Fish Biology* 36: 707-720.
- Heller Ph., Pellaud M., Bollaert E., Schleiss A., Schlaepfer R. (2007). River rehabilitation through a multi-purpose reservoir. Proceedings of the 32nd Congress of IAHR, Special session 06 (SS06-07-0), Venice, Italy, 1.-6.July 2007.
- Heller P. (2007). Méthodologie pour la conception et la gestion des aménagements hydrauliques à buts multiples par une analyse systémique. Thèse 3781 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Huet M. (1949). Aperçu des relations entre la pente et les populations piscicoles des eaux courantes. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie* 11: 333-351.
- Jakob A. (2010). Temperaturen in Schweizer Fließgewässern. GWA 3/2010.
- Jungwirth M., Haidvogel G., Moog O., Muhar S., Schmutz S. (2003). Angewandte Fischökologie an Fließgewässern, UTB Verlag Wien.
- Kantoush S., Bollaert E., De Cesare G., Boillat J.-L., Schleiss A. (2006). Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical model. Proceedings of the Fifth International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, 5th ISUD, 12-14 September 2006, ETH Zurich, Switzerland, ISBN: 3-905609-29-0, pp. 129-134, 2006
- Kantoush S.A., De Cesare G., Boillat J.L., Schleiss A.J. (2008). Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modeling, *Flow Measurement and Instrumentation* 19 (2008) 139–144.
- Küttel S., Peter A., Wüest A. (2002). Rhône Revitalisierung, Temperaturpräferenzen und – limiten von Fischarten Schweizerischer Fließgewässer, Publikation Nr. 1.
- Lambert T.R., Hanson F.D., Morhardt J.E. (1987). Development of habitat suitability criteria for trout in the Kings river Basin, California. Pacific Gas and Electric Company, Report 09, 4-87.10.
- Larinier M., Porchet J.-P., Travade F., Gosset C. (1999). Passes à poissons. Expertise, Conception des ouvrages de franchissement. Documentation française, Collection Mise au point, ISBN 2-11-088083-X.
- Lauper A., Robiolio A. (2006). Des turbines en eaux troubles. Recensement des biens culturels, immeubles du Canton de Fribourg. Fiche 042/2006.
- Martinerie R., Müller M., De Cesare G., Boillat J.-L., (2008). Vortices at intake works of pump-storage schemes. Proc. of the 6th International Symposium on Ultrasonic

- Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, 6th ISUD, 9-11 September 2008, Prague, Czech Republic, ISBN: 978-80-87117-05-7, pp. 119-122
- Meier W. (2002). Modellierung der Auswirkungen von Kraftwerken auf physikalische und chemische Eigenschaften von Bergbächen. Dissertation ETH Zürich.
- Meile T., Fette M., Baumann P. (2005). Synthese Schwall/Sunk. Publikation des Rhone-Thur Projektes. EAWAG, WSL, LCH-EPFL, Limnex. 48 pp.
- Meile T. (2007). Influence of macro-roughness of walls on steady and unsteady flow in a channel. Thèse 3952, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Meile T., Boillat J.-L., Schleiss A.J. (2011). Hydropeaking indicators for characterization of Upper-Rhone River in Switzerland. *Aqua Sci.* 2011, 73: 171-182.
- Met-Flow (2002). UVP monitor-Model UVP-DUO User guide. www.met-flow.com.
- Milhous R.T., Updike M.A., Schneider D.M. (1989). Physical habitat simulation system reference manuel-Version II. Instream flow information paper n°26, U.S. Fish and Wildlife Service. Biological report 89/16. Washington D.C.
- Milhous R.T. (1999). Nose velocities in physical habitat simulation. Proceedings of the XXVIII IAHR Congress, 22-27 August 1999, Graz, Austria.
- Moore K.M.S., Gregory S.V. (1988). Response of young-of-year Cutthroat trout to manipulation of habitat structure in a small stream. *Transaction of the American Fisheries Society*, 117, 162-170.
- Murchie K.J., Hair K.P.E., Pullen C.E., Redpath T.D., Stephens H.R. Cooke S.J. (2008). Fish response to modified flow regimes in regulated rivers, Research methods, effects and opportunities, *River Research and Applications* 24: 197 - 217.
- Nilipour N., De Cesare G., Boillat J.-L. (2004). Application of UVP transducers to measure bed geometry and velocity profiles in a hydraulic scale model with gravel pit. Proceedings 4th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (4th ISUD), Hokkaido University, Sapporo, Japan, 6-8. September 2004, pp. 41-46.
- Orth D.J. (1987). Ecological considerations in the development and application of instream flow habitat models. *Regulated Rivers : Research & Management*, 1, 171-181.
- Ovidio M., Capra H., Philippart J.-C. (2008). Regulated discharge produces substantial demographic changes on four typical fish species of a small salmonid stream. *Hydrobiologia* 609:59-70.
- Olsen R. B. (2006). A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multiblock option, user's manual, version 1.1 and

- 2.0. Department of hydraulic and environmental engineering, the Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim.
- Pardé M. (1933). Fleuves et rivières. Editions Armand Collin, Collection U2.
- Patankar S.V. (1980). Numerical heat transfert and fluid flow, Mc Graw-Hill book Company, New York.
- Pedersen L.F., Koed A., Malte H. (2008). Swimming performance of wild and F1-hatchery-reared Atlantic Salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*Salmo trutta*) smolts. Ecology of Freshwater Fish 2008: 17, p. 425 – 431.
- Pellaud M. (2007). Ecological response of a multi-purpose river development project using macro-invertebrates richness and fish habitat value. Thèse 3807 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Peter A. (1987). Untersuchungen über die Populationsdynamik der Bachforelle (*Salmo trutta fario*) im System der Wigger, mit besonderer Berücksichtigung der Besatzproblematik. Diss. Nr. 8307, Eidgenössische Technische Hochschule Zurich.
- Peter A., Schager E. (2004). Le déclin piscicole est dû à une qualité morphologique insuffisante des cours d'eau. Rapport final du projet Réseau suisse poissons en diminution. EAWAG/OFEV, 2004.
- Ponzo G. (1978). La tentative d'industrialisation des années 1870-1875 à Fribourg. EPFL-Département d'Architecture, Lausanne.
- Pouilly M. (1994). Relations entre l'habitat physique et les poissons des zones à cyprinidés rhéophiles dans 3 cours d'eau rhodaniens : vers une simulation de la capacité d'accueil pour les peuplements. Doctorat, Université Claude Bernard-Lyon I-BEA/LHQ CEMAGREF.
- Raleigh R. F., Zuckerman L. D., Nelson P. C. (1986). Habitat suitability index models and instream flow suitability curves : brown trout revised. US Fish and Wildlife Service Biological Report 82 : 10.124.
- Ribi J.-M., Steffen K., Boillat J.-L., Peter A., Schleiss A.J. (2009). Influence of geometry of fish shelters in river banks on their attractiveness for fishes during hydropeaking. Proceedings of the 33rd Congress of IAHR, Vancouver, Canada, August 9-14, ISBN: 978-94-90365-01-1. pp. 6074–6081.
- Ribi J.-M., Boillat J.-L., Schleiss A. J. (2010). Flow exchange between a channel and a rectangular embayment equipped with a diverting structure. Proceedings of the 5th International Conference on Fluvial Hydraulics River Flow 2010, September 8-10, Braunschweig, Germany, Eds.: Dittrich, Koll, Aeberle & Geisenhainer, Bundesanstalt für Wasserbau, ISBN 978-3-939230-00-7, p. 665–671.

- Ribi J.-M., Boillat J.-L., Peter A., Schleiss A. J. (2010). Fish behavior during hydropeaking in a channel equipped with a lateral shelter. Proceedings of the 8th International Symposium on Ecohydraulics (ISE 2010), COEX, Seoul, Korea, September 12-16, 2010, p. 675-682.
- Riethmuller M.L. (2005). Vélocimétrie et granulométrie laser en mécanique des fluides. Association francophone de vélocimétrie laser, Ecole d'automne, St-Pierre d'Oléron, 12-16 septembre 2005.
- Rosier B., Jordan F., De Cesare G., Boillat J.-L., Schleiss A. (2004). Determination of velocity profiles and bed morphology using UVP transducers to investigate the influence of lateral overflow on mobile bed. Proceedings 4th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (4TH ISUD), Hokkaido University, Sapporo, Japan, 6.-8. September 2004, pp. 47-50
- Schager E., Peter A. (2001). Bachforellensömmerlinge Phase 1, Netzwerk Fischrückgang Schweiz, EAWAG.
- Schager E., Peter A. (2002). Bachforellensömmerlinge Phase 2, Netzwerk Fischrückgang Schweiz, EAWAG.
- Schager E., Peter A., Burhardt-Holm P. (2007), Status of young-of-year brown trout (*Salmo trutta fario*) in Swiss streams : factor influencing YOY trout recruitment, Aquatic Sciences 69 (2007) 41-50.
- Schleiss A. (2007). L'hydraulique suisse: Un grand potentiel de croissance par l'augmentation de la puissance. Bulletin SEV 02/07.
- Schleiss A., Peter, A., Faeh, R., Scheidegger, C. (2008). Dynamische Lebensräume und Hochwasserschutz – Forschungsprojekt « Integrales Flussgebietsmanagement ». Wasser-Energie-Luft 100 (3): 187–194.
- Scruton D. A., Heggnes J., Valentin S., Harby A., and Bakken T. H. (1998). Field sampling design and spatial scale in habitat-hydraulic modelling: comparison of three models. Fisheries Management and Ecology, 5, 225-240.
- Scruton D. A., Ollerhead, L. M. Clarke K. D., Pennel C., Alfredsen K., Harby A., Kelley D. (2003). The behaviour response of juvenile Atlantic Salmon and brown trout to experimental hydropeaking power generation on a Newfoundland river. River Research and Application, 19, 577-587.
- Schneider M. (2001): Habitat- und Abflussmodellierung für Fließgewässer mit unscharfen Berechnungsansätzen. – Dissertation, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, Heft 108, Universität Stuttgart, Eigenverlag, Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, Stuttgart.

- Silva A.T., Santos J.M., Franco A.C., Ferreira M.T., Pinheiro A.N. (2009). Selection of iberian barbel (*Barbus bocagei*) for orifices and notches upon different hydraulic configurations in an experimental pool-type fishway. *J. Appl. Ichthyol* 25, 173-177.
- Silva A.T., Santos J.M., Ferreira M.T., Pinheiro A.N., Katopodis C. (2010) Passage efficiency of offset and straight orifices for upstream movements of iberian barbel in a pool-type fishway. *Riv. Res. Appl.* 2010.
- Smith G.E., Aceituno M.E. (1987). Habitat preference criteria for brown, brook and rainbow trout in eastern Sierra Nevada streams. Final report, State of California, Department of Fish and Game.
- Souchon Y., Lamouroux N., Capra H., Chandesris A. (2003). La méthodologie Estimhab dans le paysage des méthodes de microhabitat. Note technique, CEMAGREF Lyon.
- Steffen K. (2009). Etude de refuges à poissons aménagés dans les berges de rivières soumises aux éclusées. Travail de Master, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).
- Strahler A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union* 8 (6): 913–920.
- Studley T.K., Spina A.P. (1992). Study flows for the response of fish populations to altered flows project. Pacific Gas and Electric Company, California.
- Toffolon M., Siviglia A., Zolezzi G. (2010). Thermal wave dynamics in rivers affected by hydropeaking. *Water Resources Research*, 46.
- Townsend C. R. (1989). The patch dynamic concept of stream community ecology. *Journal of North American Benthology*, 8: p. 36-50.
- Valentin S. (1995). Variabilité artificielle des conditions d'habitat et conséquences sur les peuplements aquatiques: effets écologiques des éclusées hydroélectriques en rivière, Etude de cas et approches expérimentales, thèse, Université de Claude Bernard – Lyon.
- Valentin S. (1996). Modeling temporal variations of physical habitat for brown trout (*Salmo trutta*) in hydropeaking conditions, regulated rivers. *Research & Management*, 12, 317-330.
- Valentin S. (1996). Effets des éclusées hydroélectriques en rivière : diagnostic hydroécologique et aide à la gestion. Exemple de la Fontaulière (Ardèche). *La Houille Blanche* 5-1996, 25-31.
- Varley M. (1967). British freshwater fishes : factor affecting their distribution. Fishing news, London.

- Vehanen T., Bjerke P. L., Heggenes J., Huusko A., and Mäki-Petäys A. (2000). Effect of fluctuating flow and temperature on cover type selection and behaviour by juvenile brown trout in artificial flumes. *Journal of Fish Biology*, 56, 923-937.
- Vibert R. (1939). Répercussions piscicoles du fonctionnement par éclusées des usines hydroélectriques. *Bulletin français de pisciculture* 116-117.
- Vismara A., Azzellino R., Bosi R., Crosa G., Gentili G. (2001). Habitat suitability curves for brown trout (*Salmo trutta fario* L.) in the river Adda, northern Italy: Comparing univariate and multivariate approaches, *Regul. Rivers: Res. Mgmt.* 17: 37–50 (2001).
- Wasson J.-G., Malavoï J.-R., Maridet L., Souchon Y., Paulin L. (1998). Impacts écologiques de la chenalisation des rivières, ISBN 2-85362-502-8, CEMAGREF éditions.
- Weingarten R., Aschwanden H. (1992). Discharge regime-the basis for the estimation of average flows. Plate 5.2, *Hydrological Atlas of Switzerland*.
- Weitbrecht, V. (2004). "Influence of Dead-Water Zones on the Dispersive Mass Transport in Rivers," Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe.
- Zolezzi G., Siviglia A., Toffolon M., Maiolini B. (2010). Thermopeaking in Alpine streams : event characterization and time scales. *Ecohydrol.* 2010.

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été mené sous la Direction de Prof. Dr. Anton J. Schleiss, et la co-direction de Dr Jean-Louis Boillat. Dr. Armin Peter a apporté son expertise en biologie des poissons.

Les partenaires scientifiques sont le Laboratoire de Construction Hydrauliques de l'EPFL, l'EAWAG et l'Ecole d'ingénieurs et d'Architectes de Fribourg.

La pièce maitresse de ce projet est le canal expérimental de la Maigrauge. Il a pu être installé et exploité dans des conditions optimales dans l'ancienne usine hydroélectrique de la Maigrauge à Fribourg (Suisse) grâce à la bienveillance de la Direction et des collaborateurs du Groupe-E. Il pu être réalisé et exploité grâce à l'appui donné à ce projet par la Direction et les collaborateurs de l'Institut de la Construction et de l'Environnement de l'Ecole d'Ingénieurs et d'Architectes de Fribourg.

La partie expérimentale a été menée avec la collaboration de Yanis Schaller. Kathrina Steffen a contribué aux essais et aux simulations numériques, dans le cadre de son travail de master effectué sur ce sujet, au Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'EPFL. Brigitte Germann-Arnold de l'EAWAG a procédé aux pêches électriques au Tannenbach. Durant toutes les étapes de ce projet, des collaborateurs et collaboratrices de Ribi SA et du Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'EPFL ont été mis à contribution.

Ce projet a été financé par l'Office fédéral de l'Environnement OFEV et par l'Ecole d'Ingénieurs et d'Architectes de Fribourg, avec le soutien de l'Etat de Fribourg, Groupe-E, KWO-Grimselstrom et Ribi SA, dans le cadre du projet CTI n° 9676-1. Ces partenaires ont aussi massivement contribué sous forme de prestations propres.

Toute ma reconnaissance et mes remerciements vont aux personnes citées, à la Direction des organismes mentionnés et aux collaborateurs qui se sont impliqués.

Lausanne, le 16 septembre 2011

- N° 37 2008 S. A. Kantoush
Experimental study on the influence of the geometry of shallow reservoirs on flow patterns and sedimentation by suspended sediments
- N° 38 2008 F. Jordan, J. García Hernández, J. Dubois, J.-L. Boillat
Minerve - Modélisation des intempéries de nature extrême du Rhône valaisan et de leurs effets
- N° 39 2009 A. Duarte
An experimental study on main flow, secondary flow and turbulence in open-channel bends with emphasis on their interaction with the outer-bank geometry
- N° 40 2009 11. JUWI
Treffen junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an Wasserbauinstituten
- N° 41 2010 Master of Advanced Studies (MAS) in Water Resources Management and Engineering, édition 2005-2007 - Collection des articles des travaux de diplôme
- N° 42 2010 M. Studer
Analyse von Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen auf verschiedenen Typen von Blockrampen
- N° 43 2010 Master of Advanced Studies (MAS) in Hydraulic Engineering, édition 2007-2009 - Collection des articles des travaux de diplôme
- N° 44 2010 J.-L. Boillat, M. Bieri, P. Sirvent, J. Dubois
TURBEAU – Turbinage des eaux potables
- N° 45 2011 J. Jenzer Althaus
Sediment evacuation from reservoirs through intakes by jet induced flow
- N° 46 2011 M. Leite Ribeiro
Influence of tributary widening on confluence morphodynamics
- N° 47 2011 M. Federspiel
Response of an embedded block impacted by high-velocity jets
- N° 48 2011 J. García Hernández
Flood management in a complex river basin with a real-time decision support system based on hydrological forecasts
- N° 49 2011 F. Hachem
Monitoring of steel-lined pressure shafts considering water-hammer wave signals and fluid-structure interaction
- N° 50 2011 J.-M. Ribi
Etude expérimentale de refuges à poissons aménagés dans les berges de rivières soumises aux éclusées hydroélectriques



ISSN 1661-1179

Prof. Dr A. Schleiss
Laboratoire de constructions hydrauliques - LCH
EPFL, Bât. GC, Station 18, CH-1015 Lausanne
<http://lch.epfl.ch>
e-mail: secretariat.lch@epfl.ch